

**Entwicklung und Erprobung von Rezepturen für extrem dichten und  
dauerhaften Beton für Bauwerke für den Gewässerschutz**

**Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben**

**Bericht erstattet von**

**Dipl. Min. F. Schmidt  
Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy  
Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann**

**Das Forschungsvorhaben wurde vom Niedersächsischen Minister für Wissenschaft  
und Kunst aus Mitteln des Zahlenlottos gefördert.**

## Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	4
2.	Einleitung	5
3.	Charakterisierung der korrosiven Medien	6
3.1	In der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen einzulagernde Stoffe	6
3.2	Chemische Zusammensetzung der Sickerwässer der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen	6
3.3	Mögliche korrosive Einflüsse der Sickerwässer auf Beton	9
3.4	Für die Versuche verwendete Flüssigkeiten	14
4.	Versuchsbetone	18
4.1	Ausgangsstoffe	18
4.1.1	Zemente	18
4.1.2	Flugasche	20
4.1.3	Silikastaub	21
4.1.4	Zuschlag	24
4.1.5	Betonverflüssiger bzw. Fließmittel	24
4.2	Diskussion der Korngrößenverteilung der einzelnen Betone	24
4.3	Wasserzementwert	26
4.4	Mischungsentwurf und Frischbetonkennwerte der Betone	26
4.5	Nachbehandlung	29
4.6	Probenpräparation	29
5.	Untersuchungen am unkorrodierten Beton	29
5.1	Druckfestigkeit	30
5.2	Transportparameter	31
5.2.1	Wassereindringtiefe	32
5.2.2	Trocknungsverhalten der Betone	32
5.2.3	Sauerstoffpermeabilität	34
5.2.4	Gesamte offene Porosität	36
5.2.5	Kapillare Wasseraufnahme	36
5.2.6	Porenradienverteilung	37
5.2.7	Theoretische Deutung der Porenradienverteilung nach der Theorie von Gaber	38

5.3	Differentialthermoanalyse und -gravimetrie (DTA/TG)	43
5.4	Carbonatisierungstiefe	45
6.	Beaufschlagung der Betonproben mit korrosiven Flüssigkeiten	47
6.1	Drucklose Beaufschlagung	47
6.2	Druckbeaufschlagung	47
6.3	Präparation der Proben nach der Beaufschlagung	48
7.	Untersuchungen am beaufschlagten Beton	49
7.1	Makroskopische Veränderungen der Proben während dem Beaufschlagen	49
7.1.1	Einlagerung in die Flüssigkeit Lö1	50
7.1.2	Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2	50
7.1.3	Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2 + Org.	52
7.1.4	Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2 unter 10 bar Druck	52
7.1.5	Einlagerung in die Flüssigkeit Lö3	52
7.1.6	Einlagerung in ein Sickerwasser der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen, Flüssigkeit SDH	53
7.1.7	Einlagerung in Trinkwasser	53
7.2	Porenradienverteilung	54
7.3	Sauerstoffpermeabilität	55
7.4	Umbildungen des Mineralbestandes in den beaufschlagten Betonproben	57
7.5	Chemische Untersuchungen	58
7.6	Biegezugfestigkeit	62
8.	Diskussion	65
9.	Literaturverzeichnis	69
10.	Anhang	74
10.1	Kurze Erläuterungen zu den verwendeten chemisch-physikalischen Analyseverfahren	74
10.1.1	Quecksilberdruckporosimetrie (MIP)	74
10.1.2	Differentialthermoanalyse und -gravimetrie (DTA/TG)	74
10.1.3	Sauerstoffpermeabilität System VDZ	74
10.1.4	Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD)	75
10.1.5	Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)	75
10.1.6	Korngrößenbestimmung mit Hilfe eines Laser Granulometers	75
10.2	Tabellen und Abbildungen	76

## 1. ZUSAMMENFASSUNG

Es ist geplant die niedersächsischen Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen (SDH) durch mehrere Ringschächte aus Beton zu erweitern. In diesem Zusammenhang wurden Betonrezepturen entwickelt und erprobt, die einen großen Widerstand gegen korrosive Einflüsse durch Deponiesickerwässer und ähnliche Flüssigkeiten aufweisen. Dazu wurden acht Betone unter Verwendung von Portlandzement, Hochofenzement, Flugasche und Silikastaub hergestellt, die eine große Korrosionsbeständigkeit erwarten ließen. Die Betone wurden anhand der Parameter Druckfestigkeit, Wassereindringtiefe, Trocknungsverhalten, Sauerstoffpermeabilität, Gesamtporosität, Kapillare Wasseraufnahme, Porenradienverteilung, Phasenbestand und Carbonatisierungstiefe vergleichend untersucht. Die Beständigkeit der Betone wurde durch Einlagerungsversuche (Dauer fünf Monate) in verschiedenen Flüssigkeiten geprüft. Die korrosiven Medien orientierten sich an den Sickerwässern der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen. Die eingelagerten Proben wurden auf ihre Porenradienverteilung, die Sauerstoffpermeabilität, auf Umbildungen des Phasenbestandes, Eindringen von Chlorid, Sulfat und Zink sowie auf ihre Biegezugfestigkeit untersucht. Alle Betone zeigten bei lösendem Angriff durch austauschfähige Salze bzw. niedrigem pH-Wert etwa gleiche Abtragungsraten. In einer Lösung mit hohem Sulfat- und Schwermetallgehalt bildeten die Betone mit Portlandzement eine Kruste aus Gips und einem Magnesium-Mangan-Zink-Sulfat-Hydroxid-Hydrat. Treibende Phasen konnten innerhalb der Betone jedoch nicht nachgewiesen werden. Vor allem aufgrund der sehr kleinen Transportkoeffizienten, der günstigen Porenradienverteilung, einem großen Widerstand gegen das Eindringen von Chlorid, der geringen Wärmeentwicklung und einem sehr geringen Wassereindringen erscheint ein Beton mit hochgeschlacktem Hochofenzement mit Flugaschezusatz als die günstigste getestete Rezeptur.

## 2. EINLEITUNG

Der Schutz von Gewässern und Grundwasser gegen Verunreinigungen durch aggressive oder toxische Medien hat sich in den letzten Jahren als zunehmend wichtige Umweltschutzaufgabe erwiesen. Nicht nur Bauwerke zum Lagern, Auffangen und Transport von Gefahrgütern, sondern auch Deponiebauwerke wie z.B. die niedersächsische Tiefdeponie in Klein Biewende sind mit Hilfe des Baustoffes Beton errichtet worden. Die TA Abfall schreibt eine bestimmte Dichtungsart für Deponiebauwerke, die sogenannte Kombinationsdichtung, zwingend vor. Dieses Dichtungskonzept läßt sich auch im Zusammenhang mit Ringschachtdeponien aus Beton verwirklichen, wenn auch mit erhöhten Kosten. Mit Hilfe von Schachtbauwerken aus Beton kann jedoch das Platzangebot des vorhandenen Deponiegeländes wesentlich besser genutzt werden. Die daraus folgende Verringerung der Deponieumschließungsfläche hat den Vorteil, daß die Dichteigenschaft der Deponie besser überwacht werden kann. Weiterhin ist bei so kompakten Bauwerken eine Überdachung gegenüber Polderdeponien vergleichsweise leicht realisierbar. Die Überdachung einer Deponie während der Betriebsphase ist ein wesentliches Instrument zur Sickerwasserverminderung. Zur Zeit ist die Erweiterung der niedersächsischen Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen (SDH) durch mehrere Ringschächte aus Beton in der Planung. In diesem Zusammenhang sollten Betonrezepturen entwickelt und erprobt werden, die einen großen Widerstand gegen korrosive Einflüsse durch Deponiesickerwässer und ähnliche Flüssigkeiten aufweisen. Verbunden mit der Forderung nach hohem Korrosionswiderstand war die Forderung nach Erhalt der Dichtigkeit des Betons. Deponiesickerwässer enthalten betonangreifende Stoffe zum Teil in sehr hohen Konzentrationen. Die chemische Zusammensetzung dieser Flüssigkeiten ist sehr komplex und schwankt in weiten Grenzen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden deshalb der korrosive Angriff von vier synthetischen Flüssigkeiten und einem Sickerwasser der niedersächsischen Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen auf insgesamt acht verschiedene Betone untersucht.

### 3. CHARAKTERISIERUNG DER KORROSIVEN MEDIEN

#### 3.1 In der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen einzulagernde Stoffe

Die Zusammensetzung von Deponiesickerwasser hängt von der Zusammensetzung der einzulagernden Stoffe ab. In der Deponie Hoheneggelsen werden Sonderabfälle eingelagert. Was unter Sonderabfall zu verstehen ist, wird im Abfallgesetz /1/ und in der TA Sonderabfall /2/ definiert.

Es handelt sich hierbei vorwiegend um folgende Stoffe /3/:

- Säuren, Säuregemische, Beizen
- Salzschlacken (aluminiumhaltig)
- Lack- und Farbschlamm
- Bohr- und Schleifemulsion
- organische Lösemittel und Lösemittelgemische (halogenfrei und halogenhaltig)
- Aschen und Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen (MVA) und Sonderabfallverbrennungsanlagen (SVA)
- Flugstäube aus MVA, SVA, Feuerungs- und Verbrennungsanlagen
- verunreinigte Böden
- Gipsabfälle der chemischen Industrie
- Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen

Im Anhang ist unter der Tabelle 17 eine Positiv-Negativ-Liste der im neueren Teil der Polderdeponie Hoheneggelsen derzeit einzulagernden Stoffe abgedruckt.

#### 3.2 Chemische Zusammensetzung der Sickerwässer der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen

Die folgende Tabelle gibt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einen Überblick über die Zusammensetzung der bisher in Hoheneggelsen anfallenden Deponiesickerwässer in Bezug auf die wichtigsten betonangreifenden Stoffe. Zum Vergleich sind die Grenzwerte für sehr starken chemischen Angriff nach DIN 4030 und die Zusammensetzung von Meerwasser (Nordsee) angegeben.

Tab. 1: Wichtige betonangreifende Stoffe in den Sickerwässern der Deponie Hoheneggelsen.

	Einheit	Hoheneggelsen		Sehr st. chem. Angriff	Meer- wasser
		Min.	Max.		
ph Wert		4,5	12,5	4,5	
Ammonium	mg/l	<0,04	446	60	
Magnesium	mg/l	0,662	1090	3000	1330
Eisen	mg/l	<0,1	2470		
Mangan	mg/l	<0,1	1900		
Zink	mg/l	0,002	2000		
Sulfat	mg/l	<0,5	12700	3000	2780
Chlorid	mg/l	111	13600		19890

Die Tabelle 18 im Anhang zeigt darüberhinaus die Analysenwerte weiterer Substanzen, ebenfalls ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Zum Vergleich sind Maxima-Minima Werte von Sickerwässern verschiedener Hausmüll- und Sonderabfalldeponien angegeben, die den Literaturstellen /4/ und /5/ entnommen sind. Ausgewertet wurden chemische Analysen der Wässer aus den Brunnen P1 - P15 der Deponie Hoheneggelsen. Diese Polderbrunnen stehen direkt im Abfallkörper. Die Brunnen P1 - P9 aus dem Deponiebereich 1, dem ältesten Bereich der Deponie, wurden 1986 von der Firma NATEC sowie 1988 von der Firma Ökolimna (Burgwedel) untersucht. Die Brunnen P10 bis P15 aus dem Deponiebereich 2 werden jährlich abwechselnd vom Betriebslabor der SDH (1987 und 1989) und dem niedersächsischen Landesamt für Wasserwirtschaft (Hildesheim) untersucht (1988 und 1990). Die Analysen des niedersächsischen Landesamtes wurden in dieser Aufstellung nicht berücksichtigt. Es wurden nicht in allen Brunnen alle Substanzen analysiert. Desweiteren wurden solche Stoffe ausgelassen, die zwar analysiert, aber nicht nachgewiesen werden konnten. Die Tabelle gibt lediglich die Maxima-Minima Werte in ihrer gesamten Spannweite an, sie läßt keine Rückschlüsse auf einzelne Brunnen zu.

Die Deponie ist aufgeteilt in alkalische, neutrale sowie ölhaltige Bereiche. In vielen Brunnen findet man deshalb kaum organische Substanzen, dafür um so mehr anorganische Verunreinigungen und umgekehrt. Im organischen Bereich der

Altdeponie kommt es vor, daß auf der wässrigen Phase der Lösungen teerige, ölige Schichten von z.T. fester Konsistenz aufschwimmen.

Von großem Interesse ist, ob die Konzentrationen der Inhaltsstoffe der Sickerwässer noch wesentlich größer werden können. Beispielsweise könnte man vermuten, daß eine Deponieüberdachung durch das wesentlich geringere Wasserangebot zu größeren Konzentrationen in den Sickerwässern führen könnte. Dies wird im Folgenden diskutiert.

Bei der Betrachtung der chemischen Analysen fällt auf, daß bei vielen Sickerwässern das Ionenprodukt der schwerlöslichen Salze  $\text{CaF}_2$  (7),  $\text{MgF}_2$  (5),  $\text{CaSO}_4$  (2),  $\text{Sb}(\text{OH})_3$  (29),  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  (2),  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  (6),  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  (1),  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  (3),  $\text{PbF}_2$  (1),  $\text{PbSO}_4$  (1),  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  (2),  $\text{BaSO}_4$  (5),  $\text{CuSCN}$  (3), sowie der Sulfide (15) das entsprechende Löslichkeitsprodukt stark überschreitet. Die eingeklammerte Zahl gibt an, um wieviel Größenordnungen die Löslichkeitsprodukte maximal überschritten werden. Die in der Literatur angegebenen Löslichkeitsprodukte gelten jedoch nur für verdünnte Lösungen. Im Falle konzentrierter Lösungen, wie sie hier vorliegen, müssen die Konzentrationen durch die Aktivitäten der einzelnen Ionen nach der Debey-Hückel-Theorie ersetzt werden. Damit verschiebt sich das Löslichkeitsprodukt aber nur um circa eine Größenordnung. Fast alle Übergangsmetalle bilden jedoch sehr stabile Komplexe. Beispiele sind: Chrom, Cadmium, Cobalt, Kupfer, Eisen, Quecksilber, Mangan, Nickel, Blei, Thallium, Vanadium und Zink. In geringerer Stabilität bilden auch Barium, Calcium und Magnesium Komplexe. Als Liganden treten dabei z.B.  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{SCN}^-$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$  und  $\text{I}^-$  auf. Die hohen Konzentrationen der oben genannten Stoffe sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß sie teilweise in komplex gebundener Form in den Sickerwässern vorliegen (vergl./6/). Der komplex gebundene Anteil der oben genannten Stoffe spielt für Fragen der Betonkorrosion wahrscheinlich keine Rolle, da diese Ionen durch den Einbau in Komplexverbindungen chemisch weitgehend inaktiv werden. Allerdings ist diese Komplexbildung natürlich von Seiten des Umweltschutzes als negativ zu bewerten, da normalerweise schwerlösliche Ionen mobilisiert werden. Alle Angaben zur Löslichkeit und zur Komplexstabilität wurden den Handbüchern /7-9/ entnommen.

Die obige Betrachtung zeigt, daß es sich bei den Sickerwässern der Deponie Hoheneggelsen in Bezug auf die schwerlöslichen Salze im allgemeinen um konzentrierte Lösungen handelt. Besonders deutlich wird dies, wenn man die Kor-



relation zwischen den Konzentrationen der schwerlöslichen Hydroxide und dem pH-Wert betrachtet. Im Rahmen der vorliegenden Analysen zeigt der Brunnen P7, im Altbereich der Deponie, die höchsten Verunreinigungen mit Schwermetallen überhaupt. Gleichzeitig zeigt er den niedrigsten pH Wert (pH 4,5), was die Löslichkeit dieser Hydroxide ansteigen läßt.

Da in die Deponie Hoheneggelsen nur alkalisch bzw. neutral reagierende Abfälle eingelagert werden dürfen, ist zu erwarten, daß die in Tabelle 18 genannten Konzentrationen der Elemente Chrom, Kupfer, Nickel und Zink Maximalwerte darstellen, die auch in Zukunft nicht wesentlich (Größenordnungen) überschritten werden dürften. Die Konzentration von Sulfat wird im wesentlichen durch die Konzentration von Calcium bestimmt und umgekehrt. Calcium wird außerdem durch das schwerlösliche Calciumfluorid gebunden. Ebenso wird Magnesium durch den Fluoridgehalt bestimmt. Kupfer und Quecksilber werden durch das schwerlösliche Chlorid begrenzt und Barium durch das schwerlösliche Sulfat. Im Falle dieser Ionen ist in Zukunft nicht mit größeren Konzentrationen in den Sickerwässern zu rechnen, wenn die entsprechenden Gegenionen vorhanden sind. Der Vergleich mit den Sickerwasseranalysen anderer Deponien stützt diese These.

Ionen, deren Konzentration nicht durch schwerlösliche Verbindungen begrenzt werden, sind jedoch durchaus auch in größeren Konzentrationen zu erwarten. So sind z.B. viele Ammoniumverbindungen, Nitrite, Nitrate und viele Chloride sehr leicht löslich. Es ist nicht möglich, eine Voraussage über die zu erwartende Konzentration dieser vier Stoffe zu machen. Der Vergleich der Sickerwässer aus Hoheneggelsen mit den Sickerwässern anderer Deponien zeigt deutlich, daß diese Stoffe, sowie zusätzlich Kalium und Kupfer in anderen Deponien in noch bedeutend größeren Konzentrationen auftreten können. In anderen Deponiesickerwässern hat man z.B. durchaus Ammoniumkonzentrationen bis 6036 mg/l und Chloridkonzentrationen bis 36146 mg/l gefunden. Dies könnte in Zukunft auch bei den Sickerwässern aus Hoheneggelsen möglich sein. Auch der Anteil organischer Substanzen könnte durchaus noch ansteigen.

### 3.3 Mögliche korrosive Einflüsse der Sickerwässer auf Beton

Die folgende Übersicht zeigt, welche der Inhaltsstoffe der Sickerwässer der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen korrosiv auf Beton einwirken können. Sie

stützt sich auf Angaben in /10-14/ und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Im Rahmen der genannten Arbeiten ist öfter von "schwächeren" und "stärkeren" Kationen die Rede. Dieser Begriff meint die Basenstärke der entsprechenden Hydroxide. Entsprechende Werte können z.B. aus /15/ entnommen werden. Calleja /16/ beschreibt sehr ausführlich die einzelnen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Inhaltsstoffen einer betonangreifenden Substanz und die dadurch auftretenden Schwierigkeiten bei der Untersuchung des chemischen Angriffs auf Beton.

Ammonium ist ein schwächeres Kation als Calcium und zeigt dementsprechend Austauschvorgänge mit Calcium. Die Korrosion durch Ammonium ist gefährlicher als die Magnesiumkorrosion, da ein gasförmiger Stoff entsteht, der durch das Porensystem entweicht. Der lösende Angriff durch Ammoniumchlorid und Ammoniumnitrat ist dabei stärker als ein Angriff durch Ammoniumsulfat. Der Angriff durch Ammoniumfluorid ist äußerst langsam.

Chloridionen bewirken Bewehrungskorrosion. Sie erhöhen jedoch auch die Löslichkeit von  $\text{Ca(OH)}_2$  und verschieben die  $\text{CO}_2$ -Gleichgewichte in einer Lösung zur ungünstigen Seite. Chlorid kann im Zusammenwirken mit Calcium durch Oxichloridbildung treibend wirken. Diese Oxichloride entstehen vor allem bei niedrigen Temperaturen. Im Zusammenwirken mit Magnesium kann  $\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  gebildet werden, das treibend wirkt. Bei großem  $\text{C}_3\text{A}$  Gehalt bildet sich jedoch ungefährliches Friedel'sches Salz.

Chrom ist ein schwächeres Kation als Calcium. Es kann deshalb zu Austauschprozessen kommen.

Eisen ist ein schwächeres Kation als Calcium und zeigt dementsprechend Austauschvorgänge.

Einfache aliphatische Esther sind gefährlich für Beton.

Kalium ist ein stärkeres Kation als Calcium, es kommt also zu keinerlei Austauschvorgängen. Kalium greift jedoch  $\text{SiO}_2$  Gele an, die bei anderen Korrosionsvorgängen entstehen können. Auf diese Weise wird die Durchlässigkeit des Betons erhöht und ein vorhandener Korrosionsprozess beschleunigt.

Kobalt ist ein schwächeres Kation als Calcium und kann entsprechende Austauschvorgänge zeigen.

Kohlensäure greift neben dem  $\text{Ca(OH)}_2$  auch die CSH + CAH Phasen lösend an. Es wird  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al(OH)}_3$  gebildet. Wichtig dabei ist die sogenannte freie Kohlensäure.

Kupfer ist ein schwächeres Kation als Calcium und führt zu entsprechenden Austauschvorgängen.

Magnesium ist ein schwächeres Kation als Calcium und führt zu Austauschvorgängen. Magnesiumkorrosion ist jedoch weniger gefährlich als Ammoniumkorrosion, da kein gasförmiger, entweichender Stoff entsteht, der dem chemischen Gleichgewicht auf diese Weise entzogen wird. Bei der Magnesiumkorrosion wird das Calciumhydroxid umgewandelt in Magnesiumhydroxid und die CSH-Phasen in CMSH-Phasen die keine wesentlichen Bindungskräfte mehr aufweisen. Das entstehende Magnesiumhydroxid kann dichtend wirken.

Mangan ist ein schwächeres Kation als Calcium, es kann also zu Austauschvorgängen kommen.

Natrium ist ein stärkeres Kation als Calcium, es kommt zu keinerlei Austauschvorgängen. Allerdings erhöhen Natriumionen die Löslichkeit von  $\text{Ca(OH)}_2$  und unterstützen so einen lösenden Angriff.

Nickel ist ein schwächeres Kation als Calcium und kann zu Austauschprozessen führen.

Nitrationen wirken durch Ca-Austausch lösend und greifen auch die Bewehrung an.

Nitriten greifen ebenfalls die Bewehrung an.

Öle greifen im allgemeinen Beton nicht an. Es kann aber zum Festigkeitsverlust kommen. Öle können außerdem das Wasser aus dem Beton verdrängen, was unter Umständen bis zur Betonzerstörung führen kann.

Phenole reagieren mit  $\text{Ca(OH)}_2$  zu Calciumphenolat. Dieser Prozess führt zuerst, wie jeder treibende Angriff, zu einer Verdichtung des Betons, anschließend zum Treiben. Dieser Angriff ist aber eher gering einzuschätzen, da das Phenolat ohne Kristallwasser kristallisiert und nur eine geringe Volumenänderung auftritt. Im allgemeinen sind bis zu 70 mg/l Phenol unschädlich für Beton.

Quecksilberlösungen sind sehr gefährlich für Beton.

Säureeinwirkung auf Beton bewirkt einen lösenden Angriff. Schwache Säuren greifen das Calciumhydroxid, sowie die Aluminathydrate an. Es kommt dabei zur Bildung von  $\text{Al(OH)}_3$  Gel und leicht löslicher Calciumsalze ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca(NO}_3)_2$ ,  $\text{Ca(HS)}_2$ ,  $\text{Ca(HCO}_3)_2$ ). Starke Säuren greifen alle Bestandteile des Zementsteins an und bewirken die Bildung von  $\text{SiO}_2$  Gelen sowie die Bildung von Aluminium und Calciumsalzen. Von Säuren wird auch die Bewehrung angegriffen.

Schwefelwasserstoff kann über die Bildung von  $\text{Ca(HS)}_2$  lösend wirken. Außerdem ist die Bildung von Schwefelsäure möglich.

Sulfationen können in Beton einen treibenden Angriff bewirken. Der Treibprozess wird bei niedrigen Sulfatkonzentrationen durch die Bildung von Ettringit bestimmt. Der Ettringit entsteht dabei über die Zwischenstufe Gips. Aus

Ettringit kann sich bei Vorliegen von  $\text{CaCO}_3$  auch Thaumasit bilden, besonders bei tiefen Temperaturen. Thaumasit kann auch unter Aufzehrung von CSH-Phasen entstehen, so daß eine Entfestigung auftritt /17/. Ab 1000 mg/l Sulfat tritt die Ettringitbildung zugunsten des Gips zurück. Bei noch größeren Sulfatkonzentrationen tritt nur noch Gips auf. Sulfat im Zusammenwirken mit Natrium, Ammonium, Calcium oder Magnesium ist dabei gefährlicher als mit Kalium, Kupfer oder Aluminium. Zinksulfat zeigt einen ähnlichen Angriffsgrad wie Magnesiumsulfat. Die Korrosion durch Natriumsulfat ist bei  $\text{C}_3\text{A}$  Gehalten kleiner 9% stärker als die Magnesiumsulfatkorrosion, ansonsten schwächer. Lösungen mit Natriumsulfat weisen auch eine größere kapillare Steighöhe auf als Lösungen aus Magnesiumsulfat. Magnesiumsulfat reagiert auch mit den CSH Phasen des Zementsteins. Die Korrosion durch Magnesiumsulfat spielt nur eine Rolle bei Konzentrationen bis 4 g/l Lösung. Dabei wird kein Ettringit gebildet. Bis 7,5 g/l Lösung ist keine Korrosion zu beobachten. Darüberhinaus kommt es zu Prozessen ähnlich der reinen Magnesiumkorrosion, nicht zum Sulfattreiben. Die Wirkung von Chloridionen im Zusammenspiel mit Sulfat ist noch nicht geklärt. Einige Autoren sind der Meinung, daß die Korrosion durch Calciumsulfat und Magnesiumsulfat durch anwesende Chloridionen gefördert wird. Andererseits ist Calleja /16/ der Meinung, daß die Korrosion durch Sulfat durch Chloridionen vermindert wird. Sulfate verschieben auch die  $\text{CO}_2$  Gleichgewichte im Beton ungünstig.

Sulfid- und Hydrogensulfitionen sind für den Beton gefährlich. Sie können auch zu Sulfaten weiterreagieren.

Thiosulfationen können zur Sulfatkorrosion führen.

Vanadium ist ein schwächeres Kation als Calcium. Es kann zu Austauschprozessen kommen.

Zink ist ein schwächeres Kation als Calcium und kann zu entsprechenden Austauschvorgängen führen.

Trichlorethylen, Toluol, Xylol, Tetrachlorkohlenstoff, Perchlorethylen, Benzin, Heizöl, Kerosin und Benzol bewirken einen Festigkeitsverlust bei Durchdringung, jedoch keinen chemischen Angriff. CKW können in Kontakt mit Wasser sauer reagieren. Bei solch stark gepufferten Lösungen wie Deponiesickerwässern spielt dieser Effekt aber sicherlich keine Rolle.

Folgende Inhaltsstoffe der Sickerwässer der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen können hemmend auf korrosive Prozesse einwirken. Dabei gibt es durchaus Stoffe, die in einer bestimmten chemischen Umgebung schädlich sein können, in

einer anderen Umgebung nützlich. Die Übersicht ist wieder ohne Anspruch auf Vollständigkeit und stützt sich auf die Arbeiten /10-14/.

Calciumionen vermindern natürlich die Löslichkeit von  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Chloride können die Ettringitbildung stören, da sie die Löslichkeit von Calcium-Aluminium-Sulfaten und Calciumhydroaluminaten erhöhen und die Aluminate in schwer lösliches Friedel'sches Salz überführen. Sie erschweren auch die Gipsbildung, da die Löslichkeit von  $\text{Ca(OH)}_2$  gesteigert wird.

Fluor kann Beton durch die Bildung schwerlöslicher Fluoride erheblich dichter machen.

Die Existenz von Ionen, die schwerlösliche Hydroxide bilden, kann im basischen Milieu von Beton zur Ausfällung führen und damit zur Verstopfung der Poren. Beispiele: Barium, Calcium, Cadmium, Cobalt, Chrom, Kupfer, Eisen, Quecksilber, Magnesium, Mangan, Nickel, Blei und Zink.

Bei einer Beurteilung der Sickerwässer nach DIN 4030 ist aufgrund der hohen Ammonium- und Sulfatgehalte auf jeden Fall von einem sehr starken chemischen Angriff auszugehen. Der Magnesiumgehalt der Sickerwässer, sowie der pH-Wert spielen eine geringere Rolle. Die entsprechenden Werte lassen nur einen starken chemischen Angriff erwarten.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß insbesondere mit einem lösenden Angriff durch Ammonium, Eisen, Mangan, Zink und Magnesium, sowie durch den teilweise niedrigen pH-Wert zu rechnen ist. Die übrigen austauschfähigen Kationen liegen in vergleichsweise niedrigen Konzentrationen vor. Treibende Prozesse sind im wesentlichen nur durch den Sulfatgehalt zu erwarten. Kalklösende Kohlensäure wurde nicht bestimmt. Kalklösende Kohlensäure kommt in Deponiesickerwasser aber durchaus vor. In Sickerwasser aus Hausmülldeponien wurde nach /4/ kalkaggressive Kohlensäure bis 200 mg/l festgestellt. Durch die mikrobielle Umsetzung von organischen Komponenten entsteht  $\text{CO}_2$ . Bei einer Gasuntersuchung durch das Labor für Geoanalytik (Hildesheim) im Herbst 1988 konnte im Gasraum des Polderbrunnens 3 eine  $\text{CO}_2$  Konzentration von 0,3 Vol.% nachgewiesen werden. In den Brunnen 1, 2 und 4 bis 9 lag die entsprechende Konzentration unter der Nachweisgrenze von 0,1 Vol.%. Der Polderbrunnen 3 zeigte 1988 von den genannten Brunnen den größten CSB- und BSB<sub>5</sub>-Wert. In diesem Brunnen konnten auch nennenswerte Mengen Methan beobachtet werden. Besonders in den Bereichen, in denen große Mengen organisches Material eingelagert wird und die Sickerwässer gleichzeitig nur eine geringe Härte aufweisen, ist

auch in Sonderabfalldeponien mit kalklösender Kohlensäure in hohen Konzentrationen zu rechnen.

### 3.4 Für die Versuche verwendete Flüssigkeiten

Für die Korrosionsversuche an den acht zu untersuchenden Betonen wurden insgesamt sechs verschiedene Flüssigkeiten verwendet. Es wurden zunächst drei synthetische Flüssigkeiten hergestellt, deren chemische Zusammensetzung sich an den Sickerwässern der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen orientiert. Im Folgenden werden diese Flüssigkeiten mit den Kürzeln LÖ1 bis LÖ3 bezeichnet. Allerdings handelte es sich bei LÖ3 um keine echte Lösung, sondern um eine Trübe mit Feststoffanteil. Mit der Flüssigkeit LÖ2 wurden auch Versuche unter einem Druck von 1 MPa (10bar) durchgeführt. In diesem Zusammenhang wird diese Flüssigkeit mit dem Kürzel LÖ2 10bar bezeichnet. Weiterhin wurden die Betonproben auch in eine Flüssigkeit eingelagert, bei der LÖ2 mit einer Mischung organischer Flüssigkeiten überschichtet wurde. Diese Flüssigkeit wird im Folgenden mit LÖ2+Org. bezeichnet. Zu Vergleichszwecken wurden Proben auch in Trinkwasser eingelagert. Außerdem wurden die Betone auch in ein Original-Sickerwasser der Deponie eingelagert. Es handelte sich dabei um eine Mischung von Wässern aus den Polderbrunnen P1-4 und P6-8 die am 24.7.1990 während eines routinemäßigen Abpumpens der Brunnenflüssigkeit entnommen wurde. Diese Flüssigkeit besteht aus drei Phasen, einer klaren, wässrigen Phase, die den Hauptteil der Flüssigkeit ausmacht, einer schwarzen, öligen, stechend riechenden Phase und einem zumeist braun gefärbten Bodensatz. Diese Flüssigkeit wird mit dem Kürzel SDH bezeichnet. Da in dieser Flüssigkeit ein lösender Angriff stattfand, wurde die wässrige Phase auf die wichtigsten Elemente, die einen lösenden Angriff hervorrufen können, sowie auf Calcium analysiert. Die Kationen wurden über Atomabsorptionsspektroskopie analysiert. Ammonium wurde halbquantitativ mit Merckoquant Stäbchen bestimmt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendeten Flüssigkeiten:

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Beaufschlagungsflüssigkeiten.

Komponente	Einh.	Lö1	Lö2	Lö3	Lö2+Org	SDH
Wässrige Phase	Vol. %	100	100	95,2	96	87
	M. %	100	100			89
pH-Wert		6,0	5,0	2,5	5,0	5,6
Calcium	mg/l		96,000	2590,0	96,000	1973
Magnesium	mg/l		1090,0	1090,0	1090,0	756
Eisen (II)	mg/l			2470,0		3
Mangan (II)	mg/l		1900,0	1900,0	1900,0	155
Chrom (III)	mg/l		2,91	2,91	2,91	
Kupfer	mg/l		16,5	16,5	16,5	64
Nickel	mg/l		7,400	7,400	7,400	
Zink	mg/l		2000,0	2000,0	2000,0	
Blei (II)	mg/l		1,05	1,05	1,05	
Barium	mg/l			177		
Kobalt	mg/l		5,00	5,00	5,00	>30 <60
Ammonium	mg/l	446,0	446,0	446,0	446,0	
Natrium	mg/l	5510,6	8280,8	3386,4	8280,8	
Kalium	mg/l		1460,0	1460,0	1460,0	
Fluorid	mg/l			48,970		
Chlorid	mg/l		13600	13600	13600	
Sulfat	mg/l	12700	12700	12700	12700	
Sulfid	mg/l			0,25		
Nitrat	mg/l		10,40	10,40	10,40	
Nitrit	mg/l		0,65	0,65	0,65	
Borat	mg/l		163,2	163,2	163,2	

Fortsetzung nächste Seite

Zu Tabelle 2

Komponente	Einh.	Löl	Lö2	Lö3	Lö2+Org	SDH
organische Phase	V.%	0	0	0	4	13
	M.%	0	0	0		11
n-Hexan	V.%				7,9	
n-Decan	V.%				4,1	
Dichlormethan	V.%				5,3	
Dichlorethan	V.%				5,8	
Trichlorpropan	V.%				4,6	
Xylol	V.%				20,0	
Toluol	V.%				52,2	
Bodensatz	V.%	0	0	4,8	0	

Zu beachten ist, daß das Eisen in der Flüssigkeit Lö3 wahrscheinlich nach einiger Zeit in 3-wertiger Form vorlag, da diese Flüssigkeit nach gewisser Zeit einen Farbumschlag von grün nach orange zeigte. Die Tabelle 19 im Anhang zeigt, mit welchen Chemikalien die Flüssigkeiten im einzelnen hergestellt wurden.

Die synthetischen Flüssigkeiten wurden nach folgenden Prinzipien zusammengestellt:

Die Flüssigkeit Löl sollte nur solche Stoffe enthalten, die nach der DIN 4030 einen chemischen Angriff auf Beton erwarten lassen und keine schwerlöslichen Hydroxide bilden. Solche schwerlöslichen Hydroxide können das Porensystem eines Betons verstopfen und so eventuelle Korrosionserscheinungen verzögern. Daher enthielt diese Flüssigkeit nur Ammonium und Sulfat. Als entsprechendes Kation wurde Natrium ausgewählt.

Die Flüssigkeit Lö2 sollte alle nennenswerten anorganischen Inhaltstoffe der Deponiesickerwässer enthalten. Es sollte sich jedoch noch um eine wirkliche Lösung handeln. Beim pH-Wert der Lösung sollten also noch keine Ausfällungen zu beobachten sein. Darum sind in dieser Lösung kein Barium, kein Fluorid und kein Sulfid enthalten. Die Konzentrationen der Inhaltsstoffe wurden auf die Maximalwerte der SDH Analysen eingestellt, mit Ausnahme der Konzentration von



Eisen, Calcium, Natrium und Chrom. Calcium kann hemmend auf betonkorrosive Prozesse einwirken. Die Wirkung von Eisen ist nicht eindeutig festzulegen. Eisen kann als austauschfähiges Kation wirken, kann aber auch korrosive Prozesse hemmen. Weiterhin gibt es Anzeichen dafür, daß das Vorhandensein von Eisenionen die Sulfatkorrosion durch Bildung eines kurzstengeligen, nicht treibenden Ettringits vermindert /17/. Deshalb wurden beide Ionen auf die Minimalwerte der SDH Analysen eingestellt. Natrium diente wieder als Ion, über das der restliche Ladungsausgleich vorgenommen wurde. Chrom war nur in Form des leichtlöslichen Chromnitrats zu handhaben. Wegen des begrenzenden Nitratgehaltes wurde der Chromgehalt auf einen relativ niedrigen Wert eingestellt. Die Flüssigkeit Lö3 enthielt alle anorganischen Inhaltsstoffe in der maximalen Konzentration der Deponiewässer außer Chrom, Natrium und Fluorid aus bei Lö2 genannten Gründen. Fluorid kann u.U. die Dichtigkeit eines Betons erhöhen. Es wurde durch die Substanz Bariumfluorid in die Flüssigkeit eingebracht, so daß der Fluoridgehalt durch den Bariumgehalt auf einen relativ niedrigen Wert begrenzt wurde. Die Flüssigkeit Lö3 hatte einen pH-Wert von 2,5. Dieser Wert lag unter dem niedrigsten Wert, der für Sickerwässer der Deponie Hoheneggelsen gemessen worden ist. Trotzdem wurde der pH-Wert nicht erhöht, um den Einfluß eines kombinierten lösenden/treibenden Angriffs auf die Versuchsbetone zu studieren.

Die Flüssigkeit Lö2+Org enthielt neben den Inhaltsstoffen der Flüssigkeit Lö2 noch einige organische Komponenten. n-Hexan und n-Decan wurden als Hauptvertreter der Kohlenwasserstoffe in den verschiedenen Kraftstoffen ausgewählt. Die Chlorierten Kohlenwasserstoffe (CKW), Dichlormethan, Dichlorethan und Trichlorpropan treten als organische Belastungen in den Deponiesickerwässern in relativ großen Mengen auf. Ebenso Xylol und Toluol als organische Lösungsmittel. Benzol, das in den Deponiesickerwässern ebenfalls in relativ großen Mengen auftritt, kann zwar festigkeitsmindernd auf Beton einwirken, ihn aber nicht chemisch schädigen. Auch die verschiedenen Phenole, die in den Deponiesickerwässern vorkommen, können in der vorliegenden Konzentration wahrscheinlich keine wesentliche korrosive Wirkung auf Beton entfalten. Aus diesem Grund wurden diese krebserregenden Stoffe nicht in die Versuchsflüssigkeit aufgenommen.

## 4. VERSUCHSBETONE

Aufgabe des Forschungsvorhabens war es, extrem dichten und dauerhaften Beton für den Einsatz in einer chemisch korrosiven Umgebung herzustellen. Dies setzte voraus, daß der Wasserzementwert nach oben beschränkt wurde. Da der Zementstein i.d.R. der Teil des Betons ist, der chemisch angegriffen wird und auch die Wärmeentwicklung bei der Hydratation dicker Betonbauteile beschränkt werden muß, durfte der Zementleimbedarf nicht zu groß gewählt werden. Man mußte also mit Betonverflüssigern oder Fließmittel arbeiten. Betonzusatzstoffe und -mittel können sich positiv auf die Dauerhaftigkeit von Beton auswirken. In unseren Versuchen haben wir den Einfluß einer Flugasche und eines Silikastaubes auf die Dauerhaftigkeit von Beton untersucht. Die einzelnen Überlegungen zur Festlegung der Betonrezepturen werden im Folgenden diskutiert.

### 4.1 Ausgangsstoffe

#### 4.1.1 Zemente

Da es sich bei den geplanten Ringschächten aus Beton um Bauwerke mit Wanddicken von 0,8 - 1,2 m handeln muß, wurden von vorne herein nur NW-Zemente in die Überlegungen zur Betonrezeptur aufgenommen. Aus statischen Gründen sind für solche Bauwerke keine hohen Betonfestigkeiten nötig. Andererseits kann auch die Bildung breiter Risse im jungen Alter durch die Verwendung eines langsam erhärtenden Zements niedriger Festigkeit vermindert werden. Aus diesem Grund wurde die Zementfestigkeitsklasse Z35 angestrebt. Aufgrund des Sulfatgehaltes in den Deponiesickerwässern kamen nur HS-Zemente in Frage. In der Literatur wird berichtet, daß Hochofenzement allgemein eine große Dichtigkeit und damit verbunden auch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen verschiedene chemische Stoffe besitzt (abgesehen von der Carbonatisierung). Besonders die große Beständigkeit von hochgeschlacktem Hochofenzement in Meerwasser und anderen sulfathaltigen Wässern, sowie in Chlorid- und Magnesiumlösungen ist hervorzuheben [16,18-20]. Mörtel aus sulfatbeständigem Hochofenzement zeigen bei der Prüfung auf Sulfatbeständigkeit in der Regel auch kleinere Dehnungen als Mörtel aus sulfatbeständigem Portlandzement. Kollek et al. [21] sind jedoch der Meinung, daß sulfatbeständiger Portlandzement Hochofenzement bei

Sulfatangriff überlegen ist. Sie stellten fest, daß Hochofenzement auf Magnesiumsulfatlösungen ungünstiger reagiert, als auf Natriumsulfatlösungen. Im Falle reiner Portlandzemente erreicht man die Sulfatbeständigkeit durch eine Reduzierung des  $C_3A$  Gehaltes. Man vermutet, daß die Sulfatbeständigkeit von hochgeschlackten Hochofenzementen auf dem "Verdünnungseffekt" des Portlandzementklinkers durch die Hochofenschlacke beruht, auf der feinen Porenstruktur solcher Betone, einer verstärkten Sorption negativer Ionen an den Porenwandungen aufgrund  $SiO_2$  reicherer CSH-Phasen und auf der verlangsamten Gegendiffusion von  $OH^-$ -Ionen aufgrund der niedrigeren  $OH^-$  Konzentration in der Porenlösung. Diese Punkte gelten auch für Betone mit Puzzolanen. Außerdem ist Calciumhydroxid in ausreichender Menge eine Voraussetzung zur Ettringit- bzw. Gipsbildung und zur Bildung von einigen treibenden Oxichloriden. Die Calciumhydroxidkonzentration in Betonen aus Hochofenzement ist kleiner als die entsprechende Konzentration in Betonen aus Portlandzement. Ähnliches gilt für Betone mit Puzzolanen. Weiterhin ist bekannt, daß der Chloriddiffusionswiderstand von Hochofenzementbetonen mit großem Hüttensandgehalt wesentlich größer ist, als der reiner Portlandzementbetone, ebenso der elektrolytische Widerstand, der für den Korrosionswiderstand der Bewehrung von Bedeutung ist /16,22,23/. Für den Chloriddiffusionswiderstand ist wieder die Adsorption der negativen Chloridionen an den Porenwänden von großer Bedeutung. Sie führt zum Abbau der Konzentrationsgradienten und damit zur Verlangsamung der Diffusion /24/. Von Göhring et al. /25/ wurden Korrosionsversuche mit Betonen aus hochgeschlacktem Hochofenzement, Portlandzement und sulfatbeständigem Portlandzement in einer Lösung von 15,96 g/l Sulfat, 264,14 g/l Chlorid, 91,04 g/l Magnesium, 3,14 g/l Kalium und 4,72 g/l Natrium durchgeführt. In dieser extrem salzreichen, chloriddominierten Lösung zeigte der Beton mit Hochofenzement den größten Korrosionswiderstand, der Beton mit sulfatbeständigem Portlandzement den geringsten Korrosionswiderstand.

Es sollten sowohl Versuche mit Betonen aus Hochofenzement als auch Versuche mit Betonen aus Portlandzement durchgeführt werden. Es wurden schließlich die beiden folgenden Zemente für die Untersuchungen ausgewählt:

HOZ 35 L-NW/HS/NA der Firma TEUTONIA, Hannover-Anderten

PZ 35 L-NW/HS der Firma Heidelberger Zement AG, Werk Blautal, Blaubeuren

Die wichtigsten Kenndaten dieser Zemente, nach Herstellerangaben, sowie nach eigenen Untersuchungen, finden sich im Anhang in den Tabellen 20 und 22. Von beiden Zementen wurde mit Hilfe eines Laser-Granulometers (HR850, Cilas Alcatel) des Wilhelm Klauditz Institutes der Fraunhofer Arbeitsgruppe für Holzforschung, Braunschweig, eine Korngrößenverteilung aufgenommen. Die entsprechenden Diagramme befinden sich ebenfalls im Anhang unter der Abbildung 1.

#### 4.1.2 Flugasche

Flugaschen sind staubförmige Abfallprodukte der Kohleverbrennung, die in Filtern abgeschieden werden. Sie zeigen im Zusammenhang mit Zementen eine puzzolanische Reaktion. Flugaschen können in solche aus Schmelzkammerfeuerung (höhere Temperaturen, höherer Glasanteil) und solche aus Trockenfeuerung (niedrigere Temperaturen) unterschieden werden. Die Mehrzahl der Autoren nimmt ein unterschiedliches Reaktionsverhalten von Flugaschen aus Schmelz- und Trockenfeuerung an [22,26-28]. Der größere Glasanteil der Flugaschen aus Schmelzkammerfeuerung läßt erwarten, daß solche Flugaschen reaktionsfähiger sind, und daß damit neben dem "Füllereffekt" auch eine stärkere chemische Reaktion zwischen der Flugasche und den Zementbestandteilen bzw. den Zementsteinphasen zu erwarten ist. Auch die Korngröße der Flugasche ist von großer Bedeutung für die puzzolanische Aktivität [28]. Calciumarme Flugaschen können eine positive Wirkung auf die Sulfatbeständigkeit von Beton haben. Calciumreiche Flugaschen können die Sulfatbeständigkeit von Beton verschlechtern. Die in Deutschland als Betonzusatzstoff vertriebenen Flugaschen sind in der Regel kalkarme Produkte. Die Gründe für die vergrößerte Sulfatbeständigkeit sind im wesentlichen die gleichen wie bei der Verwendung von Hochofenzement. Außerdem können die bei der puzzolanischen Reaktion gebildeten  $\text{SiO}_2$ -reichen CSH-Phasen eine "Panzerung" um die noch vorhandenen Klinkerphasen bilden [17,29]. Schießl [22] beschreibt einen günstigen Einfluß von Flugasche auf die Porenradialverteilung, sowie auf den Chloriddiffusionswiderstand und den elektrolytischen Widerstand von Beton. Ein niedriger Chloriddiffusionskoeffizient von Betonen mit Flugasche im Vergleich mit reinen Portlandzementbetonen wird auch von Roy et al. [20] beschrieben. Geiker et al. [30] beschreiben ebenfalls den günstigen Einfluß von Flugasche auf die Leitfähigkeit. Von Dhir et al. [31] wird berichtet, daß eine Flugaschezugabe zu Beton mit Portlandzement bei großen Wasserzementwerten eine deutliche Verminderung der Permeabilität für Wasser zur Folge hat. Ebenso beschreiben es Marsh und

Malhotra /32,33/. Nagataki et al. /34/ berichten über eine deutliche Verminderung der Permeabilität von Luft durch Beton mit Portlandzement, bei Verwendung von Flugasche und begründen dies über eine Veränderung der Porenstruktur. Manns et al. /35/ haben umfangreiche Untersuchungen über Beton mit hochgeschlacktem Hochofenzement mit Flugaschezusatz durchgeführt. Der Flugascheanteil betrug bis zu 20% am Bindemittel. Sie betrachten entsprechende Betonrezepturen zwar als brauchbar, konnten i.d.R. aber eine leichte Verschlechterung der gemessenen Betoneigenschaften (Druckfestigkeit, Frostwiderstand, Carbonatisierung, Wasserdampfdiffusion, Porosität, Verschleißwiderstand) feststellen. Diese Versuche wurden allerdings bei konstantem Wasserbindemittelwert, nicht bei konstantem Wasserzementwert durchgeführt. Ein Beispiel für ein Betonbauwerk unter Einsatz von HOZ-HS-Zement mit Flugaschezugabe ist in /36/ erwähnt. Die kugelige Form der meisten Flugaschekörner führt zu einem verminderten Wasseranspruch von Flugaschebetonen, so daß bei gleichem Wasserzementwert und gleicher Konsistenz Zement eingespart werden kann. Flugasche entwickelt während der puzzolanischen Reaktion nur eine Hydratationswärme von ca. 35 J/g. Sie kann also bei einer möglichen Verringerung der Zementmenge, die Wärmeentwicklung von Beton günstig beeinflussen, selbst wenn im Vergleich zur eingesparten Zementmenge viel mehr Flugasche zugegeben wird. Es wurde schließlich die Flugasche KM/C der Firma Baumineral, Herten, eine Flugasche aus Schmelzkammerfeuerung, für unsere Versuche ausgewählt. Als Zugabemenge wurden 20 Prozent des Bindemittelgehaltes festgelegt. Bei gleichzeitiger Zugabe von Flugasche und Silikastaub betrug die Zugabemenge 16 Prozent des Bindemittelgehaltes. Die wesentlichen Kenndaten der Flugasche nach eigenen Untersuchungen und Werksangaben stehen im Anhang in den Tabellen 21 und 22. Auch die Flugasche wurde mit Hilfe eines Laser-Granulometers auf ihre Korngrößenverteilung untersucht. Das entsprechende Diagramm befindet sich ebenfalls im Anhang in der Abbildung 2.

#### 4.1.3 Silikastaub

Silikastaub ist ein Abfallprodukt bei der Herstellung von siliziumhaltigen Legierungen. Bei der Herstellung dieser Legierungen entsteht gasförmiges Siliziummonoxyd, das nach Oxidation zu Siliziumdioxid in kondensierter, weitgehend amorpher Form in Filtern abgeschieden wird. Silikastaub ist im Vergleich mit Zement extrem feinkörnig und damit, in Zusammenhang mit der amorphen Struktur, sehr reaktiv. Im Zusammenhang mit Zementen findet auch hier eine

puzzolanische Reaktion statt. Der Silikastaub reagiert nach neueren Untersuchungen von Justnes et al. /37/ nicht nur mit dem  $\text{Ca(OH)}_2$ , sondern auch direkt mit den CSH-Phasen. Es findet eine verstärkte Polykondensation statt. Das C/S Verhältnis bei den pozzolanisch gebildeten CSH Phasen ist kleiner als bei den anderen CSH-Phasen /37,38/. Nach Aussagen von Sellevold /39/ steigt damit auch der Einbau von Fremdionen in die CSH-Phasen, z.B. Aluminium. Die Wärmeentwicklung von Silikastaub ist etwa ein bis zweimal größer als die einer entsprechenden Menge reinen Portlandzementes /40/. Es existieren viele Arbeiten, in denen der positive Einfluß von Silikastaub auf die Dauerhaftigkeit und die Erhöhung der Festigkeit von Beton beschrieben wird /40-43/. Allerdings gibt es auch gegenteilige Ergebnisse. Cohen et al. /38/ konnten feststellen, daß Zementpasten aus normalem und sulfatbeständigem Portlandzement mit Silikatstaub in 10 M.% Natriumsulfatlösung eine wesentlich größere, in 8,48 M.% Magnesiumsulfatlösung eine wesentlich geringere Dauerhaftigkeit aufwiesen als die Vergleichsmischungen ohne Silikastaub. Im Falle von Natriumsulfat wurde ein treibender Korrosionsprozess, im Falle von Magnesiumsulfat ein lösender Korrosionsprozess beobachtet. Es wurden sehr dünne Proben benutzt, so daß dieses Verhalten weniger auf Transportprozesse in den Probekörpern, sondern eher auf die chemische Beständigkeit der Bindemittel zurückzuführen war. Auch Kordina et al. /44/ haben vergleichende Untersuchungen zwischen Betonen aus Portlandzement und Silikastaub ( $w/z=0,4$ ), Portlandzement und Flugasche ( $w/z=0,43$ ) und Hochofenzement und Flugasche ( $w/z=0,451$ ) durchgeführt. Die Betone wurden mit 18% Salzsäure beaufschlagt. Sie stellten fest, daß bei handabgezogenen Prüfkörpern sowohl die Abtragungsrate, als auch das Chlorideindringen bei den Proben aus Portlandzement und Silikastaub am stärksten waren. In /19/ und /45/ wird jedoch berichtet, daß die Beständigkeit von Beton in Säuren durch Silikastaub wesentlich gesteigert werden kann. Nagataki et al. /34/ berichten auch über eine deutliche Verminderung der Permeabilität von Luft durch Beton mit Portlandzement bei Verwendung von Silikastaub. Kohno et al. /46/ stellten eine deutliche Verminderung der Permeabilität von Wasser bei Verwendung von Silikastaub fest, ebenso Metha /23/. Marusin /47/ konnte eine deutliche Verminderung der Chloriddiffusion bei Verwendung von Silikastaub im Vergleich zu Beton mit reinem Portlandzement feststellen. Nach Geiker et al. /30/ ist auch ein günstiger Einfluß von Silikastaub auf die Leitfähigkeit entsprechender Betone zu beobachten. Über eine verringerte Chloriddiffusion und eine kleinere Leitfähigkeit bei Verwendung von Silikastaub wird auch in /48/ berichtet. In den Fällen, in denen Betone mit Silikastaub eine größere chemische Beständigkeit aufweisen, wird dies vor allem auf die verfeinerte Porenstruktur und die entsprechend kleineren Trans-

portkoeffizienten, auf die geringere Menge leicht löslichen und entsprechend reaktivem Calciumhydroxid und den vermehrten Einbau von Fremdionen in die CSH-Phasen zurückgeführt. Die Porenstruktur silikastaubhaltiger Betone zeigt eine größere Zahl Gelporen im Verhältnis zu den Kapillarporen /33/. Silikastaub wird auch zur Herstellung hochfester Betone benutzt. Zum einen wirkt der Silikastaub dabei als sehr feinkörniger Füller und erzeugt auf diese Weise eine sehr feinkörnige CSH-Matrix. Dem erhöhten Wasseranspruch läßt sich allerdings nur mit extremen Verflüssigern begegnen. Zum anderen verändert der Silikastaub die Struktur der Bindemittel-Zuschlag-Kontaktzone. In Normalbeton ist diese Kontaktzone eine Schwächezone, in der eine Anreicherung von Mikrorissen und großen Calciumhydroxidkristallen vorliegt. Diese Mikrorisse sind ein wesentlicher Transportweg von Schadstoffen durch Beton. Die Zugabe von Silikastaub verringert die Dicke dieser Kontaktzone ganz erheblich. Auch wird die Größe der Calciumhydroxidkristalle in der Kontaktzone vermindert /23/. Diese Wirkung ist natürlich aus der Sicht der Dauerhaftigkeit ebenfalls positiv zu bewerten /43/. Allerdings ist die Rissbildung in hochfestem Beton stärker als in Normalbeton /49/. Das Schrumpfen von Beton wird durch Zugabe von Silikastaub vergrößert. Radjy et al. /50/ berichten, daß diese negativen Auswirkungen einer Zugabe von Silikastaub besonders bei Dosierungen über 10 Prozent des Zementgewichtes auftreten. Die Wirkung von Fließmitteln kann bei Verwendung von Silikastaub unterschiedlich stark ausfallen. Vereinzelt wird auch berichtet, daß unter Verwendung von Silikastaub und speziellen Verflüssigern der Wasseranspruch von Beton bei Verwendung von Silikastaub sinkt /51/. Dies konnte jedoch bei unseren Versuchen nicht beobachtet werden. Silikastaub ist in trockener Form oder in Form von Suspensionen erhältlich. Bei der Verwendung der Suspension vermeidet man eine Agglomeratbildung der sehr feinen Teilchen, was zu einer besseren Vermischung führt. Für unsere Versuche wurde die Mikrosilika Suspension MS-S 500 S der Firma Elkem GmbH, Allensbach, ausgewählt. Als Zugabemenge wurden 5 Prozent des Bindemittelgehaltes festgelegt. Bei einer solchen Zugabemenge ist die Wirksamkeit des Silikastaubes auf die Dauerhaftigkeit des Betons schon gut ausgeprägt, gleichzeitig wird die Festigkeit des Betons aber noch nicht extrem erhöht. Bei gleichzeitiger Zugabe von Mikrosilika und Flugasche betrug die Zugabemenge 4 Prozent des Bindemittelgehaltes. Die wichtigsten Kenndaten des Silikastaubes nach eigenen Untersuchungen und Werksangaben stehen im Anhang in der Tabelle 21. Auch von dem Silikastaub wurde mit Hilfe eines Laser-Granulometers eine Korngrößenverteilung aufgenommen. Das entsprechende Diagramm befindet sich ebenfalls im Anhang in der Abbildung 2.

#### 4.1.4 Zuschlag

Als Zuschlag wurde gerundetes quarzitisch/granitisch Korn der Sieblinie A/B 16 benutzt. Das Größtkorn mußte auf 16 mm begrenzt werden, da die Probengeometrie im wesentlichen durch die Benutzung einer Apparatur zur Messung der Sauerstoffpermeabilität vorgegeben war. Diese Apparatur setzt Proben von 50 mm Höhe und einem Durchmesser von 100 oder 150 mm voraus. Im Falle von 32 mm Größtkorn hätte die Probendicke deshalb nur das 1,6-fache des Größtkorndurchmessers betragen. Es wurden die Korngruppen 0/2a (Grube Plockhorst), 2/8 und 8/16 (Grube Peine) benutzt. Korngrößenanalysen der Zuschläge sowie des verwendeten Zuschlaggemisches stehen im Anhang in den Abbildungen 3 und 4.

#### 4.1.5 Betonverflüssiger bzw. Fließmittel

Verwendet wurde der Verflüssiger BV 25 der Firma Woermann, Darmstadt. Dieser Verflüssiger hat als Basis ein Acrylat-Copolymer. Es handelt sich hierbei um einen relativ moderaten Verflüssiger, so daß mit den hier vorgestellten Betonrezepturen, bei Verwendung eines stärkeren Verflüssigers, durchaus eine weichere Konsistenz, bzw. ein noch niedrigerer Wasseranpruch oder ein kleinerer Wasserzementwert zu erreichen ist. Der Verflüssiger hat eine verzögernde Wirkung. Ihm entspricht das Fließmittel FM 25.

### 4.2 Diskussion der Korngrößenverteilung der einzelnen Betone

Die Korngrößenverteilungen der Zemente, der Flugasche und des Silikastaubes wurden mit Hilfe eines Laser-Granulometers aufgenommen. Dabei mußte mit 2 Messbereichen gearbeitet werden, 0,1 - 60 Mikrometer und 1 bis 200 Mikrometer. Die Korngrößenverteilung der Betonzuschläge wurde mittels Siebanalyse bestimmt. Aus den Messwerten wurde anschließend die Korngrößenverteilungen über den gesamten Bereich zwischen 0,1 Mikrometer und 16 mm berechnet. Vereinzelt mußten dabei Werte interpoliert werden. Über die Stoffraumanteile der einzelnen Betonbestandteile wurden daraufhin auch die Korngrößenverteilungen aller acht Versuchsbetone berechnet. Die entsprechenden Diagramme stehen im Anhang in den Abbildungen 5-12. Die Werksangaben gingen in diese Berechnungen nicht ein.



Aus diesen Verteilungen kann man entnehmen, daß der Hochofenzement etwas feinkörniger ist als der verwendete Portlandzement. Durch die relativ hohen Zementgehalte in den Betonen liegt die Korngrößenverteilung der Betone generell überhalb der Fullerparabel. Die Korngrößenverteilung des Betons BPZ liegt aber insgesamt etwas näher an der Fullerparabel als die Verteilung des Betons BHOZ.

Die Flugasche hat bis circa 20 Mikrometer eine ganz ähnliche Korngrößenverteilung wie die Zemente, zeigt aber dann einen größeren Anteil an größeren Körnern um 100 Mikrometer. Dadurch wird der Verlauf der Korngrößenverteilungen der Betone in diesem Bereich etwas "glatter". Darüberhinaus führt die Flugaschezugabe die Korngrößenverteilung jedoch noch weiter von der Fullerparabel weg.

Der Silikastaub ist sehr viel feinkörniger als die Zemente bzw. die Flugasche. Die Korngrößenverteilung ist auch nicht gleichmäßig, sondern zeigt zwei ausgeprägte Maxima bei circa 0,5 Mikrometer und bei 20 Mikrometer. Der ungleichmäßige Verlauf der Korngrößenverteilung dieses Stoffes könnte damit zusammenhängen, daß bei der Kondensation der Teilchen zwei verschiedene Partikelgrößen entstehen (zwei Generationen von Teilchen, oder zwei verschiedene Kondensationslokalitäten). Eventuell liegen auch in der Suspension Partikelaggregate vor. Der Silikastaub kann die Korngrößenverteilung unterhalb 1 Mikrometer etwas verbessern. Gleichzeitig verschlechtert sich die Kurve jedoch im Bereich von 1 bis circa 200 Mikrometer, da in diesem Bereich durch die hohen Zementgehalte sowieso schon zuviel Korn vorhanden ist.

Zusammenfassend kann man sagen, daß der Silikastaub die Korngrößenverteilung nicht wesentlich verbessern kann. Die Flugasche kann die Korngrößenverteilung im Bereich von 100 Mikrometer etwas verbessern, schiebt die Verteilung aber insgesamt noch etwas von der Fullerparabel weg. Bei Betonen mit niedrigeren Zementgehalten kann eine Flugaschezugabe bzw. Silikastaubzugabe zur Optimierung der Korngrößenverteilung aber sicherlich sinnvoller sein, da in diesem Fall die Kurve nicht schon durch den Einfluß des hohen Zementgehaltes weit oberhalb der Fullerparabel verläuft. Dieser Effekt ist in der Abbildung 13 im Anhang beispielhaft aufgezeigt.

### 4.3 Wasserzementwert

Der Wasserzementwert aller Betone wurde auf 0,47 festgelegt. Dieser Wert erfüllt die DIN 4030 für sehr starken chemischen Angriff. Die ENV 206 sieht für Beton in stark chemisch angreifender Umgebung einen maximalen Wasserzementwert von 0,45, bei einem Mindestzementgehalt von 300 kg/m<sup>3</sup> Beton vor. Der Wasserzementwert wurde bei Verwendung von Flugasche bzw. Silikastaub nicht erhöht, da es nicht das Ziel dieser Arbeit war, einen möglichst kleinen Zementgehalt zu erzielen, sondern durch die Verwendung dieser Betonzusatzstoffe die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit zu erhöhen. Dabei ist in jedem Fall ein möglichst niedriger Wasserzementwert anzustreben. Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse ist dies zu beachten.

### 4.4 Mischungsentwurf und Frischbetonkennwerte der Betone

Nach den beschriebenen Kriterien wurden insgesamt acht Betone der Konsistenz KR hergestellt. Die Tabelle 3 auf den nächsten beiden Seiten gibt einen Überblick über den Mischungsentwurf und die Frischbetonkennwerte der Betone. Im Folgenden werden die Betone mit ihren Kürzeln bezeichnet, die dieser Tabelle entnommen werden können. Zu bemerken ist, daß der Luftporengehalt der Betone BHOZMS, BHOZMSFA und BPZMSFA trotz guter Verdichtung relativ hoch blieb. Es wurden Platten mit den Maßen 50 x 50 x 20 cm in nicht saugender Holzschalung betoniert. Außerdem wurden von jedem Beton drei Wasserplatten sowie zwölf Würfel 15x15x15 cm hergestellt. Sämtliche Proben wurden mit Hilfe eines Rütteltisches verdichtet.

Tabelle 3: Mischungsentwurf und Frischbetonkennwerte der Versuchsbetone.

Betone mit Hochofenzement:				
Kurzbezeichnung	BHOZ	BHOZFA	BHOZMS	BHOZMSFA
Zement	HOZ 35L-NW/HS/NA			
Masse in kg/m <sup>3</sup>	394	354	419	400
Betonzusatzstoff		Flugasche	Silikastaub	Flugasche Silikastaub
Masse in kg/m <sup>3</sup>		89	22	106/27
Wasser in kg/m <sup>3</sup>	185	166,5	197	188
Wasserzementwert	0,47	0,47	0,47	0,47
Zuschlag in kg/m <sup>3</sup>	1772	1758	1691	1608
Sieblinie	A/B 16, 35% 0/2a, 30% 2/8, 35% 8/16			
Betonverflüssiger in M.% v. Zementgewicht	0,50	0,94	1,04	1,04
Frischbetonkennwerte:				
Ausbreitmaß in cm	44	42	47	45
Luftporen in %	1,9	1,5	2,5	2,2
Dichte in kg/dm <sup>3</sup>	2,34	2,34	2,31	2,30
Temperatur in °C	20	23	23	18,2

Fortsetzung nächste Seite

Zu Tabelle 3

Betone mit Portlandzement:				
Kurzbezeichnung	BPZ	BPZFÄ	BPZMS	BPZMSFA
Zement	PZ 35L-NW/HS			
Masse in kg/m <sup>3</sup>	394	376	419	400
Betonzusatzstoff		Flugasche	Silikastaub	Flugasche Silikastaub
Masse in kg/m <sup>3</sup>		94	22	107/27
Wasser in kg/m <sup>3</sup>	185	176	197	188
Wasserzementwert	0,47	0,47	0,47	0,47
Zuschlag in kg/m <sup>3</sup>	1806	1737	1725	1640
Sieblinie	A/B 16, 35% 0/2a, 30% 2/8, 35% 8/16			
Betonverflüssiger in M.% v. Zementgewicht	0,5	1,04	0,0	1,04
Frischbetonkennwerte:				
Ausbreitmaß in cm	46	45	46	45
Luftporen in %	2,0	1,65	1,97	2,35
Dichte in kg/dm <sup>3</sup>	2,40	2,37	2,35	2,33
Temperatur in °C	23,4	20,5	18,5	21

#### 4.5 Nachbehandlung

Würfel und Wasserplatten wurden nach DIN 1048 nachbehandelt. Die Platten wurden acht Tage unter feuchten Tüchern aufbewahrt, dann entschalt und im Klimaraum bei 20°C und 65% r.F. bis zum Alter von 90 Tagen gelagert.

#### 4.6 Probenpräparation

Aus den Platten wurden je 16 Zylinder von 100 mm Durchmesser ausgebohrt und anschließend in Scheiben von 5 cm Dicke zersägt. Im Anhang ist die Lage der Proben in der betonierten Platte in Abbildung 14 skizziert. Der Abstand der äußeren Zylinder zum Rand der Platte betrug mehr als 1 cm und war damit größer als der halbe Größtkorndurchmesser. Nach [52] ist damit kein Einfluß des Betonrandbereichs auf die Betoneigenschaften der Zylinder zu erwarten.

Die äußeren Zylinder 1-12 wurden für die Korrosionsversuche, sowie zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens der Betone benutzt. Der Zylinder 15, aus dem inneren Bereich der Platte, war zur langfristigen Messung der Sauerstoffpermeabilität vorgesehen, Zylinder 16 zur Untersuchung der Porenradialverteilung sowie für die Differentialthermoanalyse. Aus diesem Zylinder wurden Scheiben aus den Tiefen von 1-2 cm, 4-5 cm und 9-10 cm entnommen (siehe Abbildung 15 im Anhang).

Alle Proben wurden nach dem Zersägen der Platte wieder in das Normklima 20°C, 65% r.F. verbracht, aus dem sie dann nach und nach für die einzelnen Prüfungen entnommen wurden. Nach Beendigung der zerstörungsfreien Prüfungen wurden diese Proben wieder in das Normklima verbracht.

### 5. UNTERSUCHUNGEN AM UNKORRODIERTEN BETON

Die beiden mittleren Scheiben jedes Zylinders wurden nach einer Trocknungszeit nach dem Sägen von mindestens 28 Tagen auf ihre Sauerstoffpermeabilität untersucht. Aus diesen Proben wurden dann insgesamt 13 Scheiben pro Beton ausgewählt und in die korrosiven Lösungen eingelagert. Weitere Proben wurden zur Prüfung der Porenradialverteilung, der Untersuchung mit der Differential-

thermoanalyse, der kapillaren Wasseraufnahme und der Gesamtporosität verwendet. Die restlichen Proben wurden weiterhin im Normklima gelagert.

### 5.1 Druckfestigkeit

Die acht Beton erreichten folgende Würfeldruckfestigkeiten:

Tabelle 4: Würfeldruckfestigkeit der Versuchsbetone in  $\text{N/mm}^2$  in Abhängigkeit vom Alter.

Betone mit Hochofenzement:				
Kurzbezeichnung:	BHOZ	BHOZFA	BHOZMS	BHOZMSFA
7 Tagen	22	26	32	32
28 Tagen	41	46	48	45
90 Tagen	49	49	57	61
180 Tagen	52	55	62	67
Betone mit Portlandzement:				
Kurzbezeichnung:	BPZ	BPZFA	BPZMS	BPZMSFA
7 Tagen	34	31	31	34
28 Tagen	49	57	57	59
90 Tagen	59	65	71	73
180 Tagen	62	69	78	73

Im Diagramm 16 im Anhang ist die Druckfestigkeitsentwicklung der Betone als Funktion der Zeit aufgetragen.

Im Falle der Betone mit Portlandzement erzeugt der Flugaschezusatz eine Steigerung der Druckfestigkeit, wobei die 7-Tage Festigkeit etwas geringer ausfällt. Eine Zugabe von Silikastaub und Flugasche erhöht die Druckfestigkeit noch mehr. Eine Zugabe von Silikastaub alleine ergibt schließlich die größte Druckfestigkeit, wobei wieder ein Abfall der 7-Tage Festigkeit zu beobachten ist.

Im Falle der Betone mit Hochofenzement ergibt sich ein etwas anderes Bild. Wiederum erzeugt ein Flugaschezusatz eine Steigerung der Druckfestigkeit, wobei auch eine Steigerung der 7-Tage Festigkeit zu beobachten ist. Eine Zugabe

von Silikastaub führt zu einer weiteren Erhöhung der Endfestigkeit und der 7-Tage Festigkeit. Die höchste Druckfestigkeit wird schließlich durch eine gleichzeitige Zugabe von Silikastaub und Flugasche erreicht. Dabei ist keine weitere Steigerung der 7-Tage Festigkeit zu beobachten.

Zu bemerken ist, daß eine große Festigkeit im jungen Alter nicht von Vorteil ist. Der Stofftransport durch gerissenen Beton hängt stark vom Rissquerschnitt ab. Viele kleine Risse verhalten sich aus der Sicht der Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit wesentlich günstiger als wenige breite Risse /53/. Große Festigkeiten im jungen Betonalter vergrößern die Gefahr breiter Risse infolge von Temperaturspannungen. Von daher sind große Festigkeiten, solange sie nicht aus der Sicht der Statik erforderlich sind, eher schädlich als nützlich.

In einem anderen Zusammenhang wurde auch die Würfeldruckfestigkeit der Betone BHOZFA und BHOZMS im jungen Alter geprüft:

Tabelle 5: Würfeldruckfestigkeit der Betone BHOZFA und BHOZMS im jungen Alter in  $\text{N/mm}^2$ :

Kurzbezeichnung:	BHOZFA	BHOZMS
1 Tag	4,7	4,9
4 Tage	22	31
7 Tage	32	41
28 Tage	51	58

Zu beachten ist, daß bei diesen Versuchen die 28-Tage Festigkeiten etwas größer ausgefallen sind.

## 5.2 Transportparameter

Die Dauerhaftigkeit von Beton in chemisch aggressiver Umgebung hängt nicht nur von der chemischen Zusammensetzung des Betons, des Zementes und der anderen Betonbestandteile ab, sondern auch ganz wesentlich von der Transportgeschwindigkeit der Schadstoffe im Beton. Welche der beiden Materialeigenschaften - chemische Zusammensetzung, Transporteigenschaften - letztlich den Verlauf einer Korrosionsreaktion bestimmt, ist meistens nicht genau zu be-

stimmen und hängt vom Einzelfall ab. Aus diesem Grund wurden Messungen zur Sauerstoffpermeabilität, zum Wassereindringen und zur kapillaren Wasseraufnahme durchgeführt. Weiterhin wurden die Gesamtporosität und das Entwässerungsverhalten der Betone untersucht. Außerdem wurde versucht, die Porenradienverteilungen der Betone mit Hilfe der Theorie von Gaber /54/, im Hinblick auf Transporteigenschaften zu interpretieren.

### 5.2.1 Wassereindringtiefe

An den Betonen wurden folgende Wasserindringtiefen nach DIN 1048 gemessen:

Tabelle 6: Wassereindringtiefe der Versuchsbetone.

Betone mit Hochofenzement:				
Kurzbezeichnung:	BHOZ	BHOZFA	BHOZMS	BHOZMSFA
Wassereindringt. in cm:	1,1	0,8	0,6	1,1
Betone mit Portlandzement:				
Kurzbezeichnung:	BPZ	BPZFA	BPZMS	BPZMSFA
Wassereindringt. in cm:	2,4	1,8	1,2	1,5

In Abbildung 17 im Anhang ist die Wassereindringtiefe nach DIN 1048 der acht Betone in Diagrammform aufgetragen.

Man erkennt, daß sowohl ein Flugaschezusatz, als auch ein Zusatz von Silikastaub die Wassereindringtiefe deutlich vermindert. Die Zugabe einer Kombination von Flugasche und Silikastaub hat nicht die gleiche dichtende Wirkung. Allgemein liegt die Wassereindringtiefe der Betone mit Hochofenzement niedriger als die Wassereindringtiefe der Betone mit Portlandzement.

### 5.2.2 Trocknungsverhalten der Betone

Einzelne Proben jeden Betons wurden in regelmäßigen Abständen gewogen. Am Ende des Forschungsvorhabens wurde das Trockengewicht dieser Proben (105°C Trocknung) geprüft. Die Entwässerungskurven befinden sich im Anhang in den Abbildungen 18-21. Es ist jeweils der Bereich der Meßkurven angegeben, wobei



pro Beton mindestens vier Proben untersucht wurden. Für die Betone BHOZMSFA und BPZMS, die zuletzt hergestellt wurden, konnten aus Zeitgründen nur sehr kurzzeitige Messungen durchgeführt werden, deren Verlauf keine weitergehende Interpretation erlaubt. Bei der Trocknung der Proben überlagern sich zwei Prozesse. Zum einen verlieren die Betone ihre Kernfeuchte, sobald die einzelnen Proben aus den betonierten Platten ausgebohrt werden. Zum anderen nehmen die Proben während des Bohrens und Sägens kapillar Wasser auf, welches dann wieder ausgetrieben wird. Da sich beide Prozesse überlagern, können aus den aufgenommen Kurven nicht direkt Diffusionskoeffizienten berechnet werden. Die Kurven lassen jedoch die folgenden Aussagen zu:

Die Kurven laufen asymptotisch auf das zur Gleichgewichtsfeuchte zugehörige Gewicht zu. Diese Asymptote liegt bei den Betonen BHOZ und BPZ bei einem relativ niedrigen, auf den trockenen Beton bezogenen Gewicht. Durch die Zugabe von Flugasche und, noch viel deutlicher, durch die Zugabe von Silikastaub steigt die Lage dieser Asymptote deutlich an und zwar bei den Betonen mit Hochofenzement und bei den Betonen mit Portlandzement etwa in gleichem Maße. Diese Betone vermögen also bei gleicher Umgebungsfeuchte eine größere Menge Wasser adsorptiv zu binden als die Betone ohne Zusatzstoffe. Die adsorptiv gebundene Menge Wasser im Porensystem eines Betons im Gleichgewicht wird von verschiedenen Parametern beeinflusst: Zunächst natürlich von der inneren Oberfläche, aber auch vom Oberflächenpotential der Porenwandungen. Welcher Parameter hier die größere Rolle spielt, kann nicht ohne weiteres entschieden werden.

Die Zeit bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte ist ein Maß für den Diffusionskoeffizienten für Wasserdampf. Die Entwässerungskurven der Betone BPZ, BPZFA und BPZMSFA verlaufen schon nach wenigen Tagen relativ flach. Dies entspricht einem schnellen Austrocknen und auch einem großen Diffusionskoeffizienten. Die Betone BHOZ, BHOZFA und BHOZMS weisen hingegen nach längerer Zeit immer noch eine merkliche Entwässerung auf. Diese Betone besitzen einen kleineren Diffusionskoeffizienten. Über die Betone BHOZMSFA und BPZMS kann keine Aussage gemacht werden.

Mit Hilfe der Entwässerungskurven wurde der Wassergehalt der Betone zum Zeitpunkt der Messung der Sauerstoffpermeabilität berechnet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Werte:

Tabelle 7: Wassergehalt der Versuchsbetone in M.% zum Zeitpunkt der Messung der Sauerstoffpermeabilität:

BHOZ	3,8	M.%
BHOZFA	3,9	M.%
BHOZMS	5,1	M.%
BHOZMSFA	5,4	M.%
BPZ	2,9	M.%
BPZFA	3,3	M.%
BPZMS	4,2	M.%
BPZMSFA	4,0	M.%

### 5.2.3 Sauerstoffpermeabilität

Es wurde von allen acht Betonen der spezifische Permeabilitätskoeffizient für Sauerstoff nach der Methode des Forschungsinstituts des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ) bestimmt. Das Verfahren wird in /55/ beschrieben. Im Gegensatz zur dortigen Beschreibung wurde die PU Manschette, die die Probe nach außen abdichtet, mit einem Gummischlauch angepresst und nicht mechanisch. Im Anhang findet sich unter der Abbildung 22 eine Schnittzeichnung der Apparatur. Die Proben wurden nach dem nassen Zuschneiden 28 Tage im Klimaraum bei 20°C und 65% r.F. getrocknet. Dieses Verfahren wurde einer schärferen Trocknungsmethode vorgezogen, da diese Proben auch noch für die Korrosionsversuche benutzt werden sollten. Ihre Porenstruktur sollte durch die Trocknung nicht wesentlich verändert werden. Eine ähnliche Trocknungsmethode wurde auch in /56/ angewandt. Pro Beton wurden mindestens 29 Messungen vorgenommen. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle 8: Spezifischer Permeabilitätskoeffizient  $k$  der Versuchsbetone für Sauerstoff in  $10^{-18} \text{ m}^2$ ; Wassergehalt in M.%. Angegeben sind die Mittelwerte, sowie die Standardabweichungen.

Kurzbezeichnung:	BHOZ	BHOZFA	BHOZMS	BHOZMSFA
$k$	7,9 +/-2,5	9,5 +/-2,2	24,8 +/-6,9	39,0 +/-9,9
Wassergehalt $w$ in M.%	3,8	3,9	5,1	5,4
Kurzbezeichnung:	BPZ	BPZFA	BPZMS	BPZMSFA
$k$	9,2 +/-1,9	10,2 +/-3,3	12,1 +/-3,1	15,6 +/-1,4
Wassergehalt $w$ in M.%	2,9	3,3	4,2	4,0

Nach der Theorie von Gaber (siehe Kapitel 5.2.7.) ist der Permeabilitätskoeffizient  $k$  von Sauerstoff direkt proportional zu  $e^{-0,7w}$ , wobei  $w$  der Wassergehalt in M.% ist. Die Betone BHOZMS und BHOZMSFA erreichten trotz großem Wassergehalt nur relativ große Sauerstoffpermeabilitäten, sind also im Vergleich mit den anderen Betonen als sehr durchlässig zu bezeichnen. Mit Ausnahme dieser verstärkt durchlässigen Betone sind die gemessenen Unterschiede zwischen den Betonen als nicht signifikant anzusehen, auch nicht bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Wassergehalte der Betone zum Prüfzeitpunkt. In der Abbildung 23 im Anhang sind die Werte noch einmal graphisch aufgetragen. Zum Vergleich: Von Bamforth /57/ wurden Gaspermeabilitäten mit Stickstoff von  $1,02 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  für einen hochfesten Beton mit einem Wasserzementwert von 0,33 und  $3,01 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  für einen Beton mit 25% Flugaschezusatz und einem Wasserzementwert von 0,41 gemessen. Gräf und Grube /56/ erhielten für einen sehr gut nachbehandelten Beton mit Portlandzement und einem Wasserzementwert von 0,5 eine Gaspermeabilität von  $1,3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ . In Versuchen von Göhring et al. /25/ erreichte ein Beton aus sulfatbeständigem Portlandzement eine etwas niedrigere Gaspermeabilität als der entsprechende Beton aus einem hochgeschlackten Hochofenzement. Diese beiden Betone wurden mit einem Wasserzementwert von 0,4 hergestellt.

Die Proben, die in den Korrosionsversuchen unter Druck beaufschlagt werden sollten, wurden anschließend mit Hilfe einer Zelle, wie sie auch zur Druckbeaufschlagung benutzt wurde (siehe Kap. 6.2.), noch einmal auf ihre Sauerstoffpermeabilität geprüft. Dabei ergaben sich zum Teil recht große Abweichungen zu den Messungen mit der Apparatur System VDZ. Die in den Druckzellen eingeklebten Proben erreichten zwischen 26 Prozent und 280 Prozent der Sauer-

stoffpermeabilität nach dem System VDZ. Systematische Abweichungen konnten jedoch nicht beobachtet werden. Diese Beobachtung, zusammen mit den relativ großen Streuungen der Messungen, zeigt, daß die Messung der Gaspermeabilität nur zwischen Betonen differenzieren kann, die sich stark voneinander unterscheiden.

#### 5.2.4 Gesamte offene Porosität

Die offene Porosität der Betone wurde durch Tränkung unter Vakuum in Anlehnung an DIN 61056 untersucht. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefaßt:

Tabelle 9: Offene Porosität der Versuchsbetone in Prozent. Angegeben sind die Mittelwerte, sowie die Standardabweichungen.

Kurzbezeichnung:	BHOZ 15,8 ±1,1	BHOZFA 15,6 ±0,6	BHOZMS 18,6 ±0,5	BHOZMSFA 18,2 ±0,5
Kurzbezeichnung:	BPZ 15,0 ±0,5	BPZFA 14,7 ±0,7	BPZMS 17,7 ±0,4	BPZMSFA 16,1 ±1,0

In der Abbildung 23 im Anhang sind die Werte graphisch aufgetragen worden.

Man sieht, daß die Gesamtporosität der Betone mit Portlandzement allgemein etwas niedriger ist, als die Gesamtporosität der Betone mit Hochofenzement. Die Gesamtporosität der Betone BHOZMS und HOZMSFA, sowie der Betone BPZMSFA und BPZMS ist erhöht. Bis auf den Beton BPZMS ließen sich diese Betone auch schlecht verdichten, so daß ihr Luftporengehalt relativ hoch war.

#### 5.2.5 Kapillare Wasseraufnahme

Die kapillare Wasseraufnahme der Versuchsbetone wurde in Anlehnung an DIN 52617 bestimmt. Es zeigte sich, daß die Wasseraufnahme in der Zeitspanne zwischen  $t = 600$  Min. und  $t = 6400$  Min weitgehend linear von der Wurzel der Zeit abhing. Der Wasseraufnahmekoeffizient wurde durch lineare Regression über die Messwerte in diesem Zeitintervall bestimmt. Darüber hinaus wich die

Wasseraufnahme vom linearen Verlauf in Richtung geringere Wasseraufnahme ab, ohne daß eine Durchfeuchtung der Proben stattfand. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefaßt:

Tabelle 10: Kapillare Wasseraufnahme der acht Versuchsbetone in Anlehnung an DIN 52617 in  $10^{-2} \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$ . Angegeben sind die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen.

Kurzbezeichnung:	BHOZ 7,7 $\pm$ 0,1	BHOZFA 6,6 $\pm$ 0,7	BHOZMS 8,2 $\pm$ 1,4	BHOZMSFA 14,4 $\pm$ 0,8
Kurzbezeichnung:	BPZ 11,7 $\pm$ 3,9	BPZFA 7,3 $\pm$ 3,3	BPZMS 12,2 $\pm$ 2,2	BPZMSFA 3,9 $\pm$ 0,4

In der Abbildung 24 im Anhang sind die Ergebnisse noch einmal graphisch aufgetragen. Eine Differenzierung der Betone über die kapillare Wasseraufnahme war nicht möglich. Die Streuung der entsprechenden Koeffizienten einiger Betone war zu groß.

### 5.2.6 Porenradienverteilung

Von den acht Versuchsbetonen wurden Porenradienverteilungen im Bereich zwischen 0,00375 und 10 Mikrometern mit Hilfe eines Quecksilberdruckporosimeters aufgenommen. Alle Analysen wurden mit einem Carlo Erba Porosimeter 2000 durchgeführt. Die Rohdaten wurden mit Hilfe des Programmpakets Milestone 100 bzw. 200 ausgewertet. Es wurden pro Beton sechs Proben analysiert, wobei je zwei Proben einen Abstand von 1-2 cm, 4-5 cm und 9-10 cm von der Oberfläche des Betons hatten. Es konnten keine signifikanten Änderungen in der Porenradienverteilung in Abhängigkeit von der Lage der Proben beobachtet werden. Die Diagramme 25 bis 28 im Anhang zeigen typische Porenradienverteilungen der einzelnen Betone.

Der grundlegende Unterschied zwischen den Betonen mit Hochofenzement und den Betonen mit Portlandzement ist sofort sichtbar. Die Betone mit Hochofenzement zeigen ein starkes Maximum bei 0,01 Mikrometer, das sich nach dem unteren Meßbereich der Apparatur fortsetzt. Ein Maximum bei etwa 1 Mikrometer ist meistens nur schwach ausgeprägt, besonders bei dem Beton BHOZFA. Die Betone

mit Portlandzement zeigen ein starkes Maximum zwischen 0,02 und 0,04 Mikrometer. Zur unteren Begrenzung des Meßbereichs hin fällt die Zahl der Poren stark ab. Ein zweites Maximum bei 0,5 Mikrometer ist bei den Betonen BPZ und BPZFA stark ausgeprägt, bei dem Beton BPZMSFA weniger stark und bei dem Beton BPZMS kaum ausgeprägt. Die Unterschiede zwischen den Porenradienverteilungen der Betone mit Hochofenzement und den Betonen mit Portlandzement entsprechen den Erfahrungen aus der Literatur.

Die Auffassungen über die Grenzen der einzelnen Porenbereiche sind nicht einheitlich. Nach Romberg /58/ entstehen Luft- und Verdichtungs-poren mit Radien von  $10^3$  bis  $10^6$  nm, Kapillarporen mit 10 bis  $10^5$  nm und Gelporen mit 1 bis 10 nm Radius. Nach Reinhardt /59/ liegen die Radien der Kapillarporen zwischen 5 und  $5 \cdot 10^3$  nm und die Radien der Gelporen unter 5 nm. Richartz und Locher /60/ bezeichnen Poren zwischen 0,5 und 50 nm als Gelporen und Poren zwischen 50 und 500 nm als Kapillarporen (nach /54/). Sicherlich sind die beiden Maxima bei 0,5 bzw. 1 Mikrometer der Kontaktzonenporosität zwischen Zuschlag und Zementstein zuzuordnen /61/. Kleinere Porenradien sind der Porosität des Bindemittels zuzuordnen. Während man das ausgeprägte Maximum bei 0,03 Mikrometer im Falle der Betone mit Portlandzement wahrscheinlich der Kapillarporosität zuschlagen muß, ist eine solche Zuordnung bei den Betonen mit Hochofenzement nicht sinnvoll. Die Porenradienverteilung verläuft im Bereich, der den Kapillarporen zugeordnet wird, ohne Maximum. Im Bereich kleinerer Radien zeigt die Verteilung ein sehr breites Maximum. Eine weitergehende Interpretation der Porenradienverteilungen erfolgt im nächsten Kapitel.

### 5.2.7 Theoretische Deutung der Porenradienverteilung nach der Theorie von Gaber

Von Gaber wurde 1989 eine Arbeit vorgelegt /54/, in der er versucht, Transportkennwerte flüssiger und gasförmiger Stoffe in Mörtel aus der Porenradienverteilung abzuleiten. Eine Grundlage dieses Modells ist die Einführung der sogenannten Äquivalenzradien  $r_e$ . Der Äquivalenzradius ist der Radius, bei dem sich theoretisch der gleiche Transportkennwert ergeben würde wie beim vorhandenen Porensystem, wenn die gesamte gemessene Porosität der Probe aus Poren dieser Größe bestünde. Viele Transportkoeffizienten sind direkt proportional  $r_e^n$ . In das Gaber'sche Modell gehen darüberhinaus noch etliche weitere Überlegungen zum Porenanteil, der für den Transport zur Verfügung steht, ein.

Die Gaber'sche Theorie ist eines der ganz wenigen Modelle, die einen Zusammenhang zwischen Porenradienverteilung und Transportkoeffizienten herstellen. Deshalb wurde es trotz aller Unzulänglichkeiten, die es sicher enthält, eingesetzt, um die gemessenen Porenradienverteilungen und Porositätskennwerte im Hinblick auf mögliche Transportprozesse zu interpretieren.

Der Äquivalenzradius wird folgendermaßen definiert:

$$r_e^n = \frac{\int \frac{dV}{d \log r} r^n d \log r}{\int \frac{dV}{d \log r} d \log r}$$

Es wurde ein Computerprogramm zur Berechnungen der Äquivalenzradien aufgestellt. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die berechneten Radien. Dabei werden die Exponenten n=0,5, 1, 1,5 und 2 betrachtet.

Tabelle 11: Äquivalenzradien der Versuchsbetone nach der Theorie von Gaber.

	Äquivalenzradien in nm							
	r <sub>0,5</sub>		r		r <sub>1,5</sub>		r <sub>2</sub>	
BHOZ	39,0	±6,9	75	±19	127	±35	181	±51
BHOZFA	37,7	±2,2	73,1	±6,9	125	±14	183	±22
BHOZMS	51,	±24,5	116	±12	204	±21	290	±27
BHOZMSFA	82	±14	186	±36	306	±58	418	±77
BPZ	85,6	±3,3	135,8	±6,5	196	±12	257	±19
BPZFA	97,6	±5,0	150	±12	205	±20	257	±28
BPZMS	86	±10	137	±16	196	±24	253	±32
BPZMSFA	77,8	±8,0	134	±18	199	±30	262	±42

Fortsetzung nächste Seite

Zu Tabelle 11

	Potenzierte Äquivalenzradien			
	$r^{0,5}$	$r$	$r^{1,5}$ $\cdot 10^3$	$r^2$ $\cdot 10^4$
BHOZ	6,22 ±0,56	75 ±19	1,47 ±0,59	3,6 ±1,9
BHOZFA	6,14 ±0,19	73,1 ±6,9	1,41 ±0,23	3,40 ±0,78
BHOZMS	7,15 ±0,31	116 ±12	2,92 ±0,45	8,5 ±1,6
BHOZMSFA	9,04 ±0,74	186 ±36	5,4 ±1,6	18,1 ±6,9
BPZ	9,25 ±0,18	135,8 ±6,5	2,75 ±0,26	6,6 ±1,0
BPZFA	9,87 ±0,26	150 ±12	2,95 ±0,42	6,7 ±1,4
BPZMS	9,28 ±0,57	137 ±16	2,76 ±0,51	6,5 ±1,7
BPZMSFA	8,81 ±0,46	134 ±18	2,8 ±0,64	7,0 2,3

Man sieht, daß die Betone BHOZFA und BHOZ bei weitem die kleinsten Äquivalenzradien aufweisen. Ihre Porenradienverteilung hemmt eventuelle Transportprozesse also am stärksten. Besonders ungünstig verhält sich der Beton BHOZMSFA. Die Portlandzementbetone zeigen allgemein größere Äquivalenzradien als die Hochofenzementbetone, mit Ausnahme des BHOZMSFA.

Nach dem Gaber'schen Modell 1a läßt sich der spezifische Permeabilitätskoeffizient  $k$  für Wasser berechnen nach

$$k = a \cdot \epsilon^n \cdot r_e^2$$

Gaber erhält die besten Ergebnisse bei  $n=8$ .  $a$  ist der sogenannte Umwegfaktor, der die Abweichung der Poren von der idealisierten Form, zylindrisch und mit konstantem Querschnitt, beschreibt. Der Faktor  $a$  muß experimentell bestimmt werden und berechnet sich dann zu:

$$a = k_{\text{exp}} / (\epsilon^8 \cdot r_e^2)$$



Dabei ist:

$\overline{k_{\text{exp}}}$  das geometrische Mittel der gemessenen Permeabilitäten

und

$\overline{\epsilon^8 \cdot r_e^2}$  das geometrische Mittel aller berechneten  $\epsilon^8 \cdot r_e^2$ .

Die für Transportprozesse wirksame Porosität  $\epsilon$  wird von Gaber nach der Gleichung

$$\epsilon = (\epsilon_{\text{Hg}} \cdot \epsilon_k)^{0,5}$$

berechnet. Mit  $\epsilon_{\text{Hg}}$  bezeichnet er die gesamte, dem Quecksilber bei 200 MPA zugängliche Porosität. Sie wird berechnet über:

$$\epsilon_{\text{Hg}} = \text{Kum.Vol.Hg} \cdot \text{Trockenrohddichte}/10$$

falls die Trockenrohddichte in  $\text{g/cm}^3$  und das in der Quecksilberdruckporosimetrie erreichbare kumulative Porenvolumen in  $\text{mm}^3/\text{g}$  angegeben wird.

Der Anteil der Kapillarporen  $\epsilon_k$  berechnet er zu

$$\epsilon_k = \epsilon_{\text{Hg}} - \epsilon_v$$

wobei  $\epsilon_v$  der Anteil der Verdichtungs-poren darstellt. In die oben genannten Formeln muß  $\epsilon$  in Vol.%, und  $r_e$  in nm eingesetzt werden, um  $k$  in  $10^{-12}$  m/s zu erhalten.

Die Permeabilität für Sauerstoff läßt sich nach dem Gaber'schen Modell 1a berechnen zu:

$$k = a \cdot \epsilon^n \cdot r_e^2 \cdot \epsilon^{-0,7} w$$

falls die Strömung durch die Probe weitgehend laminar verläuft. Diese Vorbedingung wurde für unsere Messungen überprüft.  $w$  ist der Wassergehalt der Probe. Gaber erhält die besten Ergebnisse für  $n=1,5$ . Beim Einsetzen von  $\epsilon$  in Vol.%,  $w$  in M.% und  $r_e$  in nm, wird  $k$  in  $10^{-18}$   $\text{m}^2$  erhalten.

Der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient  $w$  kann nach dem Gaber'schen Modell 1a berechnet werden zu

$$w = a \cdot \epsilon^n \cdot \epsilon_v^m$$

Gaber erhält die besten Ergebnisse für  $n=1,5$  und  $m=-0,25$ . Beim Einsetzen von  $\epsilon$  in Vol.% wird  $w$  in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s}^{0,5})$  erhalten.

Auf die Berechnung der Umwegfaktoren wurde verzichtet, da es bei der Anwendung des Gaber'schen Modells auf dieses Forschungsprojekt nicht auf Absolutwerte für die Transportkoeffizienten ankam, sondern darauf, Unterschiede zwischen den einzelnen Betonen herauszuarbeiten. Die von Gaber gemessenen Umwegfaktoren  $a$  sind nicht auf dieses Forschungsprojekt übertragbar, da sie an Mörteln mit Größtkorn 4 mm gemessen wurden. Es wurden hier also immer Quotienten der Art Transportkoeffizient/Umwegfaktor berechnet. Die Tabelle 23 im Anhang gibt eine Übersicht über die zur Berechnung nötigen Werte. Die folgende Tabelle faßt die Ergebnisse der Berechnungen zusammen. Den experimentell bestimmten Werten wird dabei der jeweilige theoretische Wert nach der Gaber'sche Theorie, dividiert durch den Umwegfaktor, gegenübergestellt. Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k$  der Betone wurde nach Valenta /55/ näherungsweise aus der Wassereindringtiefe bestimmt.

Tabelle 12: Ergebnisse der Gaber'schen Theorie für die Versuchsbetone.

	Wasserdurchlässigkeit		Sauerstoffpermea.		kap. Wasseraufnahme	
	theor k/a m/s	experimentell k in 10 <sup>-14</sup> m/s	theor k/a 10 <sup>-14</sup> m <sup>2</sup>	experiment. k in 10 <sup>-18</sup> m <sup>2</sup>	theor w/a in kg/ (m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )	experiment. w in kg/ (m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )
BHOZ	0,88	5,84	6,0	7,9	20,7	7,7
BHOZFA	1,1	3,09	5,7	9,5	23,2	6,6
BHOZMS	3,1	1,91	6,2	25	20,8	8,2
BHOZMSFA	10,3	5,84	11,7	39	23,4	14,4
BPZ	1,3	27,8	20,1	9,2	19,5	11,7
BPZFA	1,5	15,6	16,0	10	21,2	7,3
BPZMS	8,1	6,94	11,4	12	27,8	12,2
BPZMSFA	1,9	10,9	10,6	5,6	20,0	3,9

Zur Verdeutlichung sind die experimentell bestimmten und die theoretisch berechneten Werte für die Sauerstoffpermeabilität und die Wasserdurchlässigkeit in den Diagrammen 29 und 30 im Anhang aneinander gegenübergestellt.

Im Falle der Sauerstoffpermeabilität gibt das Gaber'sche Modell die tatsächlichen Relationen innerhalb der beiden Gruppen, Betone mit Hochofenzement und Betone mit Portlandzement, im Rahmen der Fehlergrenzen recht gut wieder. Jedoch ist die Relation zwischen den Betonen mit Hochofenzement und den Betonen mit Portlandzement im Gaber'schen Modell zuungunsten der Betone mit Portlandzement verschoben. Dieses Mißverhältnis könnte darauf hindeuten, daß man bei Verwendung von Hochofenzement von einem anderen Umwegfaktor ausgehen muß, als bei Verwendung von Portlandzement. Gaber hat einen solchen Unterschied im Umwegfaktor in seinen Mörtelversuchen allerdings nicht nachgewiesen.

Man erkennt erhebliche Widersprüche zwischen den berechneten Werten und den experimentell bestimmten im Falle des Wassereindringens. Diese Differenzen können durch Unstimmigkeiten im theoretischen Modell oder auch durch Oberflächeneffekte der Betone hervorgerufen werden. Die Wassereindringtiefe nach DIN 1048 prüft ja den Beton an einer Oberfläche, die durch die Schalung gebildet wurde und nicht an einem Sägeschnitt durch den Kernbeton. Auch Hydratationsprozesse während der Prüfung können eine Rolle spielen.

Trotz aller Widersprüche im einzelnen, zeigt diese Aufstellung aber ganz deutlich, daß die Betone BHOZ und BHOZFA auch im theoretischen Modell nach Gaber ein sehr geringes Wassereindringen und eine sehr geringe Sauerstoffpermeabilität erwarten lassen. Die anderen Betone verhalten sich ungünstiger bzw. uneinheitlich. Der Beton BHOZ verhält sich insgesamt etwas günstiger. Bezüglich der kapillaren Wasseraufnahme sind die Unterschiede zwischen den Betonen nur minimal.

### 5.3 Differentialthermoanalyse und -gravimetrie (DTA/TG)

Von allen Betonen wurden DTA/TG-Analysen durchgeführt. Die Proben entstammten einem Betonbereich, der mindestens 9 cm von der Oberfläche der Probekörper entfernt war, also aus dem Kernbeton. Die Proben konnten jedoch nach dem Entnehmen der Bohrkerne karbonatisieren. Alle Analysen wurden mit einem Gerät STA 409 der Firma Netzsch durchgeführt. Die Versuche wurden in Luft mit

$\text{Al}_2\text{O}_3$ -Tiegeln ausgeführt. Als Referenz wurde ebenfalls  $\text{Al}_2\text{O}_3$  benutzt. Die Aufheizrate betrug 10 K/min. Die Proben wurden im Stahlmörser zerkleinert und nur die Staubfraktion kleiner 100 Mikrometer für die Analyse verwendet. In dieser Fraktion wird das Bindemittel angereichert. Es handelt sich also nicht um ein quantitatives Aufbereitungsverfahren. Da für alle Betone der gleiche Zuschlag verwendet wurde, ist davon auszugehen, daß die Anreicherung des Bindemittels im Verhältnis zum Zuschlag bei allen Betonen etwa gleich war. Das Diagramm 31 im Anhang zeigt den Verlauf der DTG Kurve im Bereich zwischen 20 und 980°C. Die DTG-Kurven zeigen die Änderung des Probengewichts als Funktion der Zeit. Man sieht zunächst den Verlust des physikalisch gebundenen Wassers bis etwa 120°C. Oberhalb dieser Temperatur wird hauptsächlich chemisch gebundenes Wasser ausgetrieben. Die beiden Prozesse überschneiden sich jedoch.

Im Bereich zwischen 440 und 540°C wird der  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Anteil des Betons zersetzt, was bei den Betonen mit Portlandzement gut zu beobachten ist. Es ist deutlich zu sehen, daß der  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Peak in der Reihenfolge BPZ, BPZFA, BPZMS und BPZMSFA abnimmt. Diese Aussage ist auf den tatsächlichen Gehalt an  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in den Betonen übertragbar, auch bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Zementgehalte der Betone. Bei den Betonen mit Hochofenzement ist die  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Zersetzung nur andeutungsweise zu erkennen.

Ab 510°C setzt eine allmähliche Zersetzung des  $\text{CaCO}_3$  ein, das bei der Carbonatisierung gebildet wird. Im Bereich von 780 bis 850°C geht diese Zersetzung sehr rasch vonstatten. Bei den Betonen mit Hochofenzement ist eine deutliche Abfolge im  $\text{CaCO}_3$  Gehalt zu erkennen. In der Reihenfolge BHOZ, BHOZFA, BHOZMS und BHOZMSFA nimmt die Stärke des  $\text{CaCO}_3$  Peaks stark ab. Beim Beton BHOZMSFA ist überhaupt kein Peak mehr zu erkennen. Bei den Betonen mit Portlandzement ist diese Abfolge nicht gegeben. Es zeigt sich jedoch auch hier, daß der Beton BPZMSFA die geringste Menge  $\text{CaCO}_3$  enthält. Zunächst erscheint es erstaunlich, daß der  $\text{CaCO}_3$  Peak der Betone mit Hochofenzement so stark ist. Man muß sich jedoch klarmachen, daß bei der Zersetzung des Calciumhydroxids pro Mol Calcium 18 Gramm Wasser freigesetzt werden, bei der Zersetzung des Carbonats aber 44 Gramm Kohlendioxid pro Mol Calcium. Bei vollständiger Carbonatisierung wird der Calciumcarbonatpeak der Betone mit Portlandzement also noch sehr viel größer werden.

Die Mehrzahl der Autoren sind nach Kropp /62/ der Meinung, daß auch die CSH-Phasen durch die Carbonatisierung zersetzt werden. Dieser Prozess wird vor

allem nach der völligen Umwandlung der Alkalihydroxide in Gang kommen. Kropp berichtet, daß feinkristalliner Calcit schon bei Temperaturen unter 600 °C thermisch zersetzt wird, während der grobkristalline Calcit, wie er z.B. bei der Carbonatisierung des bei der Hydratation gebildeten Calciumhydroxids entsteht, erst bei Temperaturen um 780 °C zersetzt wird. Die beiden Betone BHOZMS und BHOZMSFA zeigen um 600 °C einen sehr breiten, flachen Peak im DTG Diagramm. Beide Betone zeigen keine Anzeichen für noch vorhandenes Calciumhydroxid. Vielleicht könnten diese Peaks auf Calciumcarbonat zurückzuführen sein, das bei der Carbonatisierung der CSH-Phasen entstanden ist.

Die Analysen zeigen deutlich, daß der Zusatz von 5% Silikastaub zu den Betonen wesentlich mehr  $\text{Ca(OH)}_2$  konsumiert, als der Zusatz von 20% Flugasche. Der Verbrauch von  $\text{Ca(OH)}_2$  geht soweit, daß beim Beton BHOZMSFA nur sehr kleine Mengen  $\text{Ca(OH)}_2$  und  $\text{CaCO}_3$ , also das Reaktionsprodukt der Karbonatisierung, zu entdecken sind. Es bleibt zu bemerken, daß der Beton BPZMS im Bereich zwischen 520 und 720°C einen Gewichtsverlust zeigt, der bei den anderen Betonen nicht feststellbar ist. Die DTA Kurve liefert keine weiteren wesentlichen Informationen.

#### 5.4 Carbonatisierungstiefe

Die DTG Analyse der Versuchsbetone führte zu der Überlegung, die Carbonatisierungstiefe der Betone zu überprüfen. Insbesondere für den Beton BHOZMSFA erschien diese Überprüfung interessant, da in diesem Beton kaum  $\text{Ca(OH)}_2$  bzw.  $\text{CaCO}_3$  enthalten sind.

Die Prüfung der Carbonatisierungstiefe wurde mit Hilfe des Phenolphthaleintests im Alter von ca. 420 Tagen durchgeführt. Getestet wurde an Schalflächen und an Stellen, die im Alter von 90 Tagen durch Sägeschnitte freigelegt worden sind. Die Proben wurden im Klimaraum bei 20°C und 65% r.F. gelagert. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die gemessenen Tiefen in mm.

Tabelle 13: Carbonatisierungstiefe der Versuchsbetone nach 420 Tagen in mm. Lagerung der Proben bei 20°C und 65% r.F. Angegeben sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen bei mindestens 40 Messtellen.

Kurzbezeichnung:	BHOZ	BHOZFA	BHOZMS	BHOZMSFA
Schalfläche:	6,5 ±1,4	6,6 ±1,7	5,4 ±1,9	7,3 ±1,2
Sägefläche:	3,4 ±1,7	2,7 ±1,0	1,5 ±0,6	4,8 ±1,0
Kurzbezeichnung:	BPZ	BPZFA	BPZMS	BPZMSFA
Schalfläche:	2,0 ±1,5	2,5 ±1,2	4,2 ±1,9	2,3 ±1,0
Sägefläche:	1,2 ±1,0	0,1 ±0,3	0,4 ±0,7	0,4 ±0,6

Die Carbonatisierungstiefe der Betone mit Hochofenzement ist etwas größer als die der Betone mit Hochofenzement. Ähnliche Ergebnisse sind aus der Literatur für Laborproben bekannt. Die Betone mit Zusatzstoffen zeigen keine signifikante Abweichung der Carbonatisierungstiefe im Vergleich zu den entsprechenden Betonen ohne Zusatzstoffe. Zu bemerken ist, daß die Zeitdauer bis zum Erscheinen der typischen Phenolphthaleinfarbe bei den Betonen mit Hochofenzement und Puzzolanen viel größer war, als bei den Betonen mit Portlandzement. Der Indikator reagiert mit den  $\text{OH}^-$  Ionen der Porenlösung zur entsprechenden rotgefärbten Base. Diese Reaktion verläuft um so schneller, je mehr  $\text{OH}^-$  Ionen in der Porenlösung enthalten sind, und je mehr Calciumhydroxid in Lösung gehen kann, um das Gleichgewicht zwischen Porenlösung und Feststoff wieder herzustellen. Die langsame Reaktion dieser Betone mit dem Indikator ist ein Hinweis auf deren geringe Konzentration an Calciumhydroxid. Die Carbonatisierungstiefe wird allerdings nicht nur von der vorhandenen Menge Calciumhydroxids bestimmt, sondern auch ganz wesentlich von anderen Faktoren wie den Diffusionskoeffizienten von Kohlendioxid und Wasser. Für eine eventuelle Korrosion der Bewehrung ist weiterhin der elektrolytische Widerstand des Betons wichtig.

## 6. BEAUFSCHLAGUNG DER BETONPROBEN MIT KORROSIVEN FLÜSSIGKEITEN

### 6.1 Drucklose Beaufschlagung

Nach der Prüfung der Sauerstoffpermeabilität wurden je zwei Proben eines Betons in die Flüssigkeiten Löl, Lö2, Lö3, Lö2+Org., SDH, und Trinkwasser eingelagert. Bei den eingelagerten Proben handelte es sich immer um die beiden mittleren Scheiben eines ausgebohrten Zylinders.

Die Proben wurden einzeln in runde verschlossene Behälter aus Polyethylen eingelagert, die circa 0,5 Liter der korrosiven Flüssigkeit enthielten. Die Versuche fanden bei  $20 \pm 2$  °C statt. Die Proben wurden zu etwa 4/5 mit Flüssigkeit bedeckt. Diese Einlagerungsform wurde gewählt, weil sich oft in der Übergangszone feucht/trocken die größten Schäden zeigen. Während der Einlagerungsdauer waren die Behälter verschlossen, so daß keine Verdunstung der Flüssigkeiten auftreten konnte. In einer Tiefdeponie ist nicht damit zu rechnen, daß Sickerwasser in der Betonwandung so weit nach oben steigt, daß es verdunsten kann. Die Einlagerungsdauer der Proben betrug fünf Monate. Die Flüssigkeiten wurden monatlich erneuert. Die Abbildung 32 im Anhang zeigt die Einlagerungsform der Proben. Die Einlagerung in Einzelbehälter hatte den Vorteil, daß die Proben sich nicht gegenseitig beeinflussen konnten. So war es z.B. möglich, monatlich die Veränderung des pH Wertes der Einlagerungsflüssigkeit zu erfassen.

### 6.2 Druckbeaufschlagung

Eine Probe jeden Betons wurde unter 10 bar Druck (absolut) mit der Flüssigkeit Lö2 beaufschlagt.

Dazu wurde eine Druckapparatur konstruiert und gebaut. Eine Skizze dieser Apparatur findet sich im Anhang unter der Abbildung 33. Die Betonproben wurden mit einem hochchemikalienbeständigen Epoxidharz (Araldit AV138M/HV998 der Firma Ciba Geigy) in einen Edelstahlring (WN 4541) eingeklebt. Dieser Ring wurde an beiden Enden durch eine Platte aus Edelstahl (WN 4571) verschlossen. Als Dichtung zwischen den Stahlteilen wurde je eine 1 mm starke PTFE Scheibe eingelegt. Die Platten waren beide mit Bohrungen (NPT Gewinde) zur Flüssig-

keitszufuhr und zum Flüssigkeitsablauf versehen. Die Platte auf der drucklosen Seite der Druckzelle wurde mit eingefrästen Rillen versehen, so daß die Betonprobe auf dieser Platte direkt aufsitzen konnte, ohne den Ablauf von Flüssigkeit zu behindern.

Nach dem gleichen Prinzip wurde ein Vorratsbehälter für die Beaufschlagungsflüssigkeit gebaut. Statt einer Betonprobe wurde in den Edelstahlring die Flüssigkeit Lö2 eingefüllt. In die Zelle wurde eine Membrane aus PE eingebaut, die die Beaufschlagungsflüssigkeit vom Druckmedium (Pressluft) abtrennen sollte. Dieser Vorratsbehälter wurde mit acht Bohrungen versehen, so daß insgesamt acht Druckversuche zur gleichen Zeit durchgeführt werden konnten. Alle Verbindungen zwischen den Druckbehältern wurden in PTFE ausgeführt. Zum Einsatz kamen Schläuche und Fittings der Firma Labokron, Sinsheim. Zur Druckerzeugung wurde ein 15 bar Kompressor benutzt, die Druckregelung erfolgte über zwei handelsübliche Druckminderer. In der Regel konnte damit der Druck auf  $\pm 0,1$  bar konstant gehalten werden. Auch die Flüssigkeit in der Druckapparatur wurde monatlich erneuert. Die Durchlässigkeit der Proben war so gering, daß die Menge Flüssigkeit im Vorratsbehälter (cirka 0,7 Liter) bei weitem nicht aufgebraucht wurde.

Insgesamt hat sich diese Apparatur für den Langzeitversuch bewährt. Vereinzelt trat jedoch Lochkorrosion an den Stahlbauteilen auf, so daß einige Teile neu abgedreht werden mußten. Die an sich klare Flüssigkeit Lö2 war nach einmonatiger Beaufschlagung regelmäßig braun gefärbt, was ebenfalls zeigt, daß Eisen aus dem Stahl herausgelöst wird. Da es jedoch zur Zeit nicht möglich ist eine solche Druckzelle ganz aus Kunststoff zu bauen, kann man wahrscheinlich nur eine Beschichtung auf die Stahlbauteile aufbringen, um eine Korrosion zu vermeiden. Schwierig war es zeitweilig auch, die PTFE Fittings abzudichten. Wenn dies jedoch geschehen war, funktionierte die Apparatur wieder einen Monat lang ohne weitere Probleme.

### 6.3 Präparation der Proben nach der Beaufschlagung

Nach dem Ende der fünfmonatigen Beaufschlagung wurden die Proben zunächst an der Luft getrocknet. Lose anhaftende Teile von abgeschiedenen Substanzen wurden mechanisch durch Schaben und Abreiben von der Betonoberfläche entfernt. Die aufgefangenen Substanzen wurden gesammelt. Die Proben wurden während der



verschiedenen Stadien fotografiert. Die Oberfläche der Proben wurde anschließend mikroskopisch untersucht. Die Proben wurden dann für 28 Tage in ein Normklima 20 °C, 65% r.F. verbracht. Nach dieser Trocknungsperiode wurden die Proben wieder auf ihre Sauerstoffpermeabilität untersucht. Anschließend wurden aus den Proben Pulver aus der Tiefe von 0 - 0,5 cm durch Bohren entnommen. Diese Pulver wurden zur Röntgenphasenanalyse und zur chemischen Analyse benutzt. Danach wurden die Proben zersägt (siehe Abbildung 34 im Anhang). Teile der Proben wurden dann zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit und zur Bestimmung der Porenradienverteilung benutzt. Aus den Proben die unter 10 bar Druck beaufschlagt wurden, wurden auch Proben aus einer Tiefe von 1,0 - 1,5 cm erbohrt, sowie Kerne zur Bestimmung der Porenradienverteilung. Diese Proben wurden nicht zersägt.

## 7. UNTERSUCHUNGEN AM BEAUFSCHLAGTEN BETON

### 7.1 Makroskopische Veränderungen der Proben während dem Beaufschlagen

Im Folgenden werden zunächst die sichtbaren Veränderungen an den Proben während der Korrosionsversuche, sowie Veränderungen der Beaufschlagungsflüssigkeiten während der Einlagerung der Betonproben beschrieben.

Zunächst ist zu erwähnen, daß an keiner der eingelagerten Betonproben Zerstörungen durch Risse oder größere abgefallene Teile beobachtet werden konnten. Trotzdem zeigten die einzelnen Betone bei der Einlagerung in die verschiedenen korrosiven Flüssigkeiten ein differenziertes Bild von Veränderungen an der Probenoberfläche, in der Durchlässigkeit und in der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung.

Oft waren zwischen Zementstein und Zuschlag Höhenstufen zu erkennen. Im Falle eines lösenden Angriffs wurde das Bindemittel zwischen den Zuschlägen herausgelöst, in anderen Fällen bildete sich auf der Bindemittelmatrix eine fest aufsitzende Schicht. Sämtliche Veränderungen der Probenoberflächen waren nicht gleichmäßig über die Betonoberfläche verteilt. Es ließ sich eine Zone stärkster Beanspruchung beobachten, die immer parallel zur Flüssigkeitsoberfläche, etwa in der Hälfte der Flüssigkeitshöhe verlief. Die Höhenstufen zwischen Zementstein und Zuschlag in dieser Zone stärkster Beanspruchung wurden

mit Hilfe eines Mikroskops vermessen. Die Genauigkeit dieser Methode lag bei etwa  $\pm 5$  Mikrometer. Eine Voraussetzung dieser Methode ist die Annahme, daß sich die Oberfläche der Zuschlagkörner in ihrer räumlichen Lage nicht verändert hat. Es konnten jedoch keinerlei Hinweise auf Veränderungen der Zuschlagoberflächen gefunden werden.

### 7.1.1 Einlagerung in die Flüssigkeit Löl

Die Einlagerung der Betonproben in die Flüssigkeit Löl bewirkte eine Anhebung des pH-Wertes dieser Lösung von 6 auf 10 bis  $>11$ , unabhängig von der Betonsorte. Es waren keinerlei Ausfällungen zu erkennen. Beim Öffnen der Probenbehälter war ein leichter Geruch nach Ammoniak feststellbar. Ammoniak ist ein Produkt der Ammoniumkorrosion und damit ein deutliches Indiz für einen lösenden Angriff. Nach dem Trocknen und Reinigen der Proben war zu sehen, daß bei allen Betonen die Bindemittelmatrix von der Oberfläche her angegriffen wurde. Es waren Stufen zwischen dem Bindemittel und den Zuschlagkörnern zu sehen. Die Abtragungsrate betrug circa 20 Mikrometer unabhängig von der Betonsorte.

### 7.1.2 Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2

Die Einlagerung der Betonproben in die Flüssigkeit Lö2 hatte eine Erhöhung des pH-Wertes bis auf 6 zur Folge. Nach Einlagerung der Betonproben waren in der vorher klaren Lösung Ausfällungen zu beobachten. Auf der Flüssigkeitsoberfläche bildeten sich schwimmende Kristallite. An der Betonoberfläche bildeten sich zum einen deutlich nadelförmige Kristalle (Büschel), zum anderen schmierige Ausfällungen ohne deutlich erkennbare Kristallform. Beide Kristallformen bildeten sich vorzugsweise an der Bindemittelmatrix, nicht an den Zuschlagkörnern. Nach dem Trocknen nahmen diese Phasen eine leicht türkise Färbung an. Nach Untersuchungen mit dem Röntgenpulverdiffraktometer handelte es sich dabei um eine Mischphase aus Mangan-, Magnesium- und Zinksulfat-Hydroxid-Hydrat sowie Gips. Die Abbildung 35 im Anhang zeigt eine DTG Analyse dieses Gemisches. Deutlich sind die Entwässerung des Gipses bei etwa  $140^\circ\text{C}$ , sowie die starke Entwässerung des Sulfat-Hydroxid-Hydrats bei etwa  $230^\circ\text{C}$  zu erkennen. Die JCPDS-Nummer des erstgenannten Sulfats ist 5-74, die dort angegebene chemische Formel  $(\text{Mg,Mn})_9\text{Zn}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_{22}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Die türkise Verfärbung könnte auch auf einen geringen Kupferanteil hindeuten. Der Gipsan-

teil war bei den Betonen mit Portlandzement wesentlich größer als bei den Betonen mit Hochofenzement. Versuchsweise wurde die Flüssigkeit LÖ2 durch Zugabe von NaOH auf einen pH-Wert von 6 gebracht. Dieser Wert entspricht dem maximalen pH-Wert der nach Einlagerung der Betonproben in dieser Flüssigkeit gemessen wurde. Während dieser Versuche konnten Ausfällungen beobachtet werden. Nach Untersuchungen mit dem Röntgenpulverdiffraktometer handelte es sich um das oben beschriebene Sulfat. Dessen Bildung ist also auf die Zufuhr von  $\text{OH}^-$  Ionen nach Einlagerung der Betone zurückzuführen. Erwartungsgemäß wurde kein Gips ausgefällt. In einem zweiten Versuch wurde die Flüssigkeit LÖ2 mit CaCl versetzt. Dabei trat eine Ausfällung von Gips auf. Weitere Substanzen konnten nicht beobachtet werden. Die Gipsbildung ist also auf das Calcium zurückzuführen, das aus den Betonen herausgelöst wird.

Nach dem Reinigen der Proben war zu sehen, daß die Bindemittelmatrix der Betone mit Portlandzement gegenüber den Zuschlagoberflächen deutlich hervortrat. Eine Untersuchung mit dem Polarisationsmikroskop zeigte jedoch, daß es sich hierbei nicht um eine Dehnung des Zementsteines handelte, sondern um fest aufgewachsenen Kristalle auf der Bindemitteloberfläche. Es handelte sich dabei wieder um Gips und das oben beschriebene Sulfat. Die Bindemittelmatrix der Betone mit Portlandzement zeigte auch eine helle Verfärbung. Die Stufen zwischen Zementstein und Zuschlagoberflächen wurden wieder mit dem Mikroskop ausgemessen. Sie betrugen in der Zone stärkster Beanspruchung bei den Betonen BPZ 179 +/- 20 Mikrometer, BPZFA 49 +/- 15 Mikrometer, BPZMS 60 +/- 13 Mikrometer und BPZMSFA 45 +/- 12 Mikrometer. Auch diese Krustenbildung ist sicherlich einerseits auf das größere Calciumangebot, andererseits auf das größere  $\text{OH}^-$ -Ionen Angebot bei Einlagerung der Betone mit Portlandzement zurückzuführen. In Höhe des Flüssigkeitsspiegels konnte eine schwarz verfärbte Zone über die ganze Breite der Betonproben beobachtet werden. Diese Zone setzte sich nicht in das Innere der Proben fort. Wahrscheinlich handelt es sich hier um Ausfällungen von Eisen- oder Manganoxid/hydroxid, das in den Zonen erhöhten pH-Wertes (unbeeinflusster Beton) ausgeschieden wird. Bei den Betonen mit Hochofenzement konnte weder ein Hervortreten der Bindemittelmatrix, noch eine Verfärbung, noch eine dunkle Zone an der Flüssigkeitsoberfläche beobachtet werden. Abbildung 36 im Anhang zeigt den Beton BPZ nach der Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ2.

### 7.1.3 Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2 + Org.

Ganz analog waren die Beobachtungen an den Proben, die in die Flüssigkeit Lö2 + Org. eingelagert wurden. Zusätzlich ist zu bemerken, daß nach einmonatiger Lagerung meistens keine Phasengrenzfläche zwischen organischer und wässriger Phase mehr beobachtet werden konnte. Folgende Stufenhöhen wurden zwischen der Bindemitteloberfläche und den Zuschlagoberflächen vermessen: Beton BPZ 113 +/- 44 Mikrometer, BPZFA 56 +/- 20 Mikrometer, BPZMS 60 +/- 13 Mikrometer und BPZMSFA 57 +/- 9 Mikrometer. Die Abbildung 37 im Anhang zeigt den Beton BPZ während der Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2 + Org..

### 7.1.4 Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2 unter 10 bar Druck

Ähnliches konnte auch bei den Proben beobachtet werden, die mit der Flüssigkeit Lö2 unter 10 bar Druck beaufschlagt wurden. Auch hier zeigten sich die beschriebenen Ausfällungen und pH-Werte. Bei den Betonen mit Portlandzement konnte auch hier ein Hervortreten der Bindemitteloberflächen beobachtet werden. Folgende Stufenhöhen wurden vermessen: BPZ 116 +/- 34 Mikrometer, BPZFA 70 +/- 34 Mikrometer, BPZMS 48 +/- 16 Mikrometer, BPZMSFA 51 +/- 8 Mikrometer. Da bei diesen Versuchen die Proben in ihrer ganzen Fläche durchströmt wurden, konnte keine schwarze Verfärbung entlang des Flüssigkeitsspiegels beobachtet werden. Bemerkenswert ist, daß die Betonproben zwar in der ersten Zeit der fünfmonatigen Beaufschlagung noch durchströmt wurden, später jedoch auf der drucklosen Seite der Proben keinerlei Flüssigkeitsdurchtritt mehr zu beobachten war. Dies war bei allen Betonen so.

### 7.1.5 Einlagerung in die Flüssigkeit Lö3

Die Einlagerung der Betonproben in die Flüssigkeit Lö3 erhöhte deren pH-Wert von ursprünglich 2,5 auf 4,5 bis 5 unabhängig von der Betonsorte. Auf der Flüssigkeitsoberfläche bildeten sich plattige Kristalle. An der Betonoberfläche konnte ein dicker Kristallrasen beobachtet werden. Diese Kristalle waren nahe der Flüssigkeitsoberfläche dunkelrot, in größerer Tiefe orange gefärbt. Nach Röntgenpulveranalysen handelte es sich in beiden Fällen um Gips, der wahrscheinlich durch Hämatit oder eine andere Eisen(III) Verbindung, die jedoch nicht nachgewiesen werden konnte, rot gefärbt wird. Die Abbildung 35 im

Anhang zeigt eine DTG Aufnahme dieser Substanz. Deutlich ist die Gewichtabnahme (Entwässerung) bei circa 160 °C zu erkennen. Die Kristalle bildeten sich bevorzugt auf der Bindemittelmatrix, nicht auf den Zuschlagoberflächen. Dies kann dadurch erklärt werden, daß das zur Bildung des Gipses notwendige Calcium aus dem Zementstein herausgelöst wird, und sich an den Stellen höchster Calciumkonzentration dann der Gips abscheidet. Auch die Zuschläge wurden rot eingefärbt. Diese Färbung war mechanisch nicht zu entfernen. Die Einlagerung in die Flüssigkeit Lö3 führte bei allen Betonen zu einem lösenden Angriff auf den Zementstein aufgrund des niedrigen pH-Wertes. Die Stufen zwischen Zementstein und Zuschlag wurden wieder mikroskopisch vermessen. Die Stufenhöhen betrugen: BHOZ 118 +/- 18 Mikrometer, BHOZFA 111 +/- 31 Mikrometer, BHOZMS 93 +/- 37 Mikrometer, BHOZMSFA 138 +/- 32 Mikrometer, BPZ 107 +/- 35 Mikrometer, BPZFA 74 +/- 24 Mikrometer, BPZMS 116 +/- 26 Mikrometer und im Falle des Betons BPZMSFA 95 +/- 28 Mikrometer. Wie man sieht, hing die Stärke des lösenden Angriffs nicht signifikant von der Betonsorte ab. Die Abbildungen 37 und 38 im Anhang zeigen die Betone BPZ und BHOZMS nach der Einlagerung in die Flüssigkeit Lö3. Zu bemerken ist noch, daß das Bindemittel des Betons BHOZMSFA eine leicht grüne Farbe annahm.

#### 7.1.6 Einlagerung in ein Sickerwasser der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen, Flüssigkeit SDH

An den Proben, die in die Flüssigkeit SDH eingelagert wurden, konnten nur schwer äußerliche Veränderungen festgestellt werden, da diese Proben von der schwarzen organischen Komponente der Flüssigkeit verschmiert wurden. Nach der Reinigung einiger Oberflächenteile mit Methanol konnte auch hier ein geringer lösender Angriff auf das Bindemittel festgestellt werden und zwar bei allen Betonen. Die Stufenhöhen zwischen Bindemittel und Zuschlagoberflächen in den Zonen größter Beanspruchung betrugen circa 20 Mikrometer unabhängig von der Betonsorte. Die Abbildung 39 im Anhang zeigt den Beton BHOZFA während und nach der Einlagerung in die Flüssigkeit SDH.

#### 7.1.7 Einlagerung in Trinkwasser

Der pH-Wert des Trinkwassers stieg während der Einlagerung von 6 auf 10 bis größer 11.

## 7.2 Porenradienverteilung

Die Porenradienverteilung der Betone BHOZ, BHOZFA, BHOZMS, BPZ, BPZFA und BPZMS nach Einlagerung in Wasser, den Flüssigkeiten Lö2, Lö2 unter 10 bar Druck, sowie teilweise auch Lö1 und Lö3 wurde mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie untersucht. Dazu wurden Teile der beaufschlagten Proben aus 0-1 cm Tiefe entnommen. Nicht untersucht wurden die Betone BHOZMSFA und BPZMSFA.

Die Porenradienverteilungen der beaufschlagten Betone zeigten folgende Veränderungen gegenüber den Verteilungen der unbeaufschlagten Betone.

Bei den Betonen BHOZ, BHOZFA und BHOZMS konnte nach Einlagerung sowohl in Wasser, als auch bei Einlagerung in die Flüssigkeiten Lö2 und Lö2 10bar eine Vergrößerung des Porenanteils kleiner 0,01 Mikrometer beobachtet werden. Dies entspricht einer fortgesetzten Hydratation der Betone bei Wasserlagerung. Bei den Betonen BPZ, BPZFA und BPZMS ist bei Einlagerung in Wasser keine Veränderung der Porenradienverteilung zu sehen. Bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2 ist bei den Betonen BPZ und BPZFA eine Verminderung des Maximums bei 1 Mikrometer zu beobachten. Bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö2 unter 10 bar Druck ist diese Verminderung noch viel stärker ausgeprägt. Dieser Effekt ist wahrscheinlich durch Neubildung von Phasen im Porenraum zu erklären. In diesem Fall können die Veränderungen nicht über eine fortgesetzte Hydratation erklärt werden, da sie auch bei Wasserlagerung auftreten müßten. Der Beton BPZMS zeigt eine Vergrößerung des Porenanteils kleiner 0,01 Mikrometer bei Einlagerung in Lö2 und Lö2 10bar. Ein ausgeprägtes Maximum bei 1 Mikrometer ist bei diesem Beton schon im Ausgangszustand nicht vorhanden. Der Beton BHOZFA zeigt bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö3 eine Verminderung der Porenanteile kleiner 0,01 Mikrometer. Der Beton BPZ zeigt bei Einlagerung in die Flüssigkeiten Lö3 und Lö1 keine sichtbare Veränderung der Porenradienverteilung.

Tabelle 24 im Anhang gibt eine Übersicht über die gemessenen Äquivalenzradien  $r^{0,5}$  und  $r^2$  (potenziert) nach Gaber nach Beaufschlagung der Proben. Angegeben sind, soweit vorhanden, die Werte einer Doppelbestimmung, sowie die Ausgangswerte. Signifikante Änderungen in den Äquivalenzradien sind nicht zu sehen. Die Schwankungsbreiten der Doppelmessungen sind zu groß. Die Äquivalenzradien der Betone BHOZFA und BPZ wurden auch nach Beaufschlagung mit der

Flüssigkeit Lö3 gemessen. Bei dem Beton BHOZFA ist dabei eine deutliche Vergrößerung der Äquivalenzradien festzustellen. Beide Betone liegen in ihren absoluten Werten aber recht dicht beieinander.

### 7.3 Sauerstoffpermeabilität

Die beaufschlagten Proben wurden nach einer Trocknungsperiode von 28 Tagen im Klimaraum bei 20 °C, 65% r.F. wieder auf ihre Sauerstoffpermeabilität untersucht. Bei diesen Versuchen konnte der Wassergehalt der Betone nicht bestimmt werden, da dies nur zerstörend möglich ist.

Der Permeabilitätskoeffizient der beaufschlagten Proben für Sauerstoff wurde in Verhältnis gesetzt zu den Permeabilitätskoeffizienten derselben, unbeaufschlagten Proben. Dieser Quotient

$$k_{\text{beaufschlagt}} / k_{\text{unbeaufschlagt}}$$

wird um so größer, je größer die Permeabilität während der Korrosionsversuche wird. Die einzelnen Werte sind im Anhang in den Abbildungen 40-43 für alle Proben aufgetragen.

Die Sauerstoffpermeabilität nach Einlagerung in Wasser nimmt bei den Betonen BHOZ und BHOZFA leicht zu. Bei den Betonen BHOZMS, BHOZMSFA, BPZMS und BPZMSFA ist eine leichte Abnahme festzustellen. Die Betone BPZ und BPZFA zeigen einen starken Abfall der Sauerstoffpermeabilität. Der Portlandzement PZ 35 L-NW/HS der Firma Heidelberger Zement reagiert durch sein niedriges  $C_3S/C_2S$  Verhältnis extrem langsam, so daß diese Abnahme der Sauerstoffpermeabilität während der Wasserlagerung durch eine fortschreitende Hydratation erklärt werden muß. Die Mahlfeinheit des Zementes spielt in diesem Zusammenhang keine Rolle (mündl. Mitteilung Dr. Quicker, Labor Fa. Heidelberger Zement). Eine fortschreitende chemische Reaktion muß auch für die Betone BHOZMS, BHOZMSFA, BPZ und BPZMSFA angenommen werden, während es überraschend ist, daß sich die Sauerstoffpermeabilität der Betone BHOZ und BHOZFA bei Wasserlagerung nicht weiter vermindert. Die Verminderung der Durchlässigkeit bei Wasserlagerung ist positiv zu bewerten.

Um allerdings den korrosiven Einfluß der verschiedenen Lösungen auf die Betone miteinander vergleichen zu können, muß die Veränderung der Sauerstoffpermeabilität durch den Einfluß der reinen Wasserlagerung aus den Meßwerten entfernt werden. Dazu wurden alle Quotienten

$$k_{\text{beaufschlagt}} / k_{\text{unbeaufschlagt}}$$

durch den entsprechenden Wert der Wasserlagerung,

$$k_{\text{Wasser, beaufschlagt}} / k_{\text{Wasser, unbeaufschlagt}}$$

geteilt. Diese Werte werden im Folgenden als bezogene Sauerstoffpermeabilität bezeichnet. Die entsprechenden Werte sind im Anhang in den Abbildungen 44-47 dargestellt. Aus diesen Abbildungen ergibt sich folgendes:

Die bezogene Sauerstoffpermeabilität aller Betone steigt durch die Einlagerung in der Flüssigkeit Lö3 stark an. Dies steht im Einklang mit der Beobachtung, daß bei Einlagerung in Lö3 ein lösender Angriff stattfindet.

Die bezogene Sauerstoffpermeabilität nach Einlagerung in der Flüssigkeit Lö1 nimmt bei den Betonen mit Portlandzement leicht zu oder bleibt etwa gleich. Bei den Betonen mit Hochofenzement nimmt die Sauerstoffpermeabilität leicht ab. Die geringen Veränderungen der bezogenen Sauerstoffpermeabilität zeigen, daß der lösende Angriff durch die Flüssigkeit Lö1 viel schwächer ist, als in der Flüssigkeit Lö3.

In den Flüssigkeiten Lö2 und Lö2 + Org. ist bei den meisten Betonen eine deutliche Abnahme der Sauerstoffpermeabilität zu beobachten. Eine Ausnahme bildet der Beton BPZFA. Diese Abnahme kann als ein Indiz für eine Verringerung des Porenraumes durch auskristallisierende schwerlösliche Phasen gedeutet werden.

Die in der Flüssigkeit SDH eingelagerten Proben zeigen ebenfalls eine erniedrigte bezogene Sauerstoffpermeabilität und zwar bei allen Betonen. Diese Verminderung kann wieder durch Ausfällungen im Porenraum bedingt sein. Wahrscheinlicher ist aber, daß sie durch das Verkleben und Verschmieren der Proben durch die organische Phase hoher Viskosität, die diese Flüssigkeit beinhaltete, verursacht wird. Der beobachtete lösende Angriff bei allen Betonen



macht sich jedenfalls nicht in einer erhöhten Sauerstoffpermeabilität bemerkbar.

Interessant ist die sehr niedrige Sauerstoffpermeabilität der Proben, die unter 10 bar Druck mit der Flüssigkeit Lö2 beaufschlagt wurden. In vielen Fällen lag der Permeabilitätskoeffizient unterhalb der Meßgenauigkeit der Apparatur, die etwa  $k = 1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  beträgt. Diese niedrige Sauerstoffpermeabilität kann genau wie bei Einlagerung in die Flüssigkeiten Lö2 und Lö2+Org. auf auskristallisierte schwerlösliche Phasen zurückgeführt werden. Dieser Effekt wird durch den größeren Stoffumsatz aufgrund der Druckbeaufschlagung noch verstärkt.

Die Messung der Sauerstoffpermeabilität kann nur aufzeigen, wie sich die Durchlässigkeit für Sauerstoff während der Beaufschlagung ändert. Sie kann keine Aussagen darüber machen, ob diese Änderung gefährlich für den Beton ist oder nicht. Dies kann nur über die makroskopische Betrachtung der Probe und die Messung des Phasenbestandes erfolgen, auf die im nächsten Kapitel eingegangen wird.

Bei der Auswertung der Sauerstoffpermeabilität muß man sich vor Überinterpretationen hüten. Die im Anhang angegebenen Abbildungen zeigen, wie groß die Differenzen zwischen zwei Proben aus dem gleichen Beton, bei gleicher Lagerung sein können. Zwar läßt sich z.B. der lösende Angriff durch die Flüssigkeit Lö3 sehr schön beobachten, während sich dieser Vorgang bei der Prüfung der Biegezugfestigkeit (siehe Kap.7.6.) gar nicht bemerkbar macht. Unterschiede zwischen den einzelnen Betonen sind jedoch nur schwer herauszuarbeiten und werden z.B. durch den Einfluß der Wasserlagerung auf die Nachhydratation der Betone überdeckt.

#### 7.4 Umbildungen des Mineralbestandes in den beaufschlagten Betonproben

Zur Analyse des Phasenbestandes wurden von allen Betonen Pulverproben aus 0 bis 0,5 cm Tiefe entnommen. Bei den Proben die unter 10 bar mit der Flüssigkeit Lö2 beaufschlagt wurden, wurden auch Proben aus 1 bis 1,5 cm Tiefe entnommen. Als Referenz wurden von jedem Beton auch Pulverproben des unbeaufschlagten Betons genommen. Diese Pulverproben wurden mit Hilfe eines vollau-

tomatischen Pulverdiffraktometers der Firma Philips auf ihren Bestand an kristallinen Phasen analysiert.

In den Analysen waren natürlich immer Quarz, Feldspat und ein Glimmer, vermutlich Biotit, nachweisbar. Oft waren auch geringe Mengen Montmorillonit zu sehen. Diese Reflexe stammen von den Zuschlägen. In den meisten Analysen war auch Calcit zu beobachten, der bei der Carbonatisierung entsteht. Portlandit war nicht sicher nachweisbar, ist bei einigen Analysen aber wahrscheinlich.

Im Oberflächenbereich aller Betone konnte bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö3 die Bildung von Gips beobachtet werden. Weitere Neubildungen konnten nicht sicher nachgewiesen werden. Die Bildung von Friedel'schem Salz ist für einige Proben aber wahrscheinlich, ebenso die Bildung von wenig Gips bei Einlagerung des Betons BHOZ in die Flüssigkeit Lö1. Die Röntgenreflexe des in Kap 7.1.2. beschriebenen Sulfats überlagern sich bei Betonproben stark mit Reflexen einiger Phasen des Zuschlags (Feldspat, Montmorillonit). Ein sicherer Nachweis dieses Stoffes war deshalb nur möglich bei entsprechend großer Menge. Dies war nicht der Fall. Es ist jedoch zu vermuten, daß dieses Mineral nicht nur an der Oberfläche der Betone auftritt, sondern auch im oberflächennahen Porenraum. Zusammenfassend ist zu sagen, daß keine treibenden Neubildungen nachgewiesen werden konnten, da die Gipsbildung bei Einlagerung in die Flüssigkeit Lö3 nicht mit einem Treiben verbunden ist.

## 7.5 Chemische Untersuchungen

Es wurde die Konzentration von Chlorid, Sulfat und Zink in verschiedenen Tiefen der in der Flüssigkeit Lö2 eingelagerten Betonproben chemisch analysiert. Der Sulfatgehalt kann ein wesentlicher Indikator für einen treibenden Angriff sein und das Eindringen von Chlorid ist wichtig bezüglich des Korrosionsschutzes von Bewehrungsstahl. Zink ist eines der Elemente, die schwerlösliche Hydroxide bilden und mit dessen Ausfällen in der basischen Porenlösung des Betons deshalb zu rechnen ist. Als Referenz wurde von jedem Beton eine unbeflüßte Pulverprobe aus dem Kernbeton mitanalysiert.

Zur Analyse wurden Pulverproben aus 0 bis 0,5 cm Tiefe entnommen. Bei den Proben die unter 10 bar mit der Flüssigkeit Lö2 beaufschlagt wurden, wurden auch Proben aus 1 bis 1,5 cm Tiefe entnommen. Das Material aus mindestens

vier Bohrlöchern, Durchmesser 11 mm, wurde vermisch, um eine repräsentative Probe zu erhalten. Es handelt sich um das gleiche Probenmaterial, das auch zur Untersuchung mit dem Pulverdiffraktometer eingesetzt wurde. Die Proben zur Sulfat- und Zinkbestimmung (cirka 1 Gramm) wurden mit heißer Salzsäure aufgeschlossen. Sulfat wurde gravimetrisch durch Fällung mit BaCl bestimmt, Zink mit AAS. Die Proben zur Chloridbestimmung (cirka 2 Gramm) wurden mit heißer Salpetersäure aufgeschlossen. Chlorid wurde durch Titration mit Silbernitrat bestimmt. Die Analysenwerte für die Betonproben wurden anschließend über die bekannte Mischungszusammensetzung der Betone auf Masseprozent am Bindemittel umgerechnet.

In der folgenden Tabelle sind die Abweichungen der Chlorid-, Sulfat- und Zinkkonzentrationen der beaufschlagten Proben von den Konzentrationen dieser Substanzen in den unbeaufschlagten Referenzbetonen dargestellt. In der Tabelle 25 im Anhang sind die tatsächlich gemessenen Konzentrationen von Chlorid, Sulfat und Zink dargestellt.

Tabelle 14: Abweichungen der Chlorid-, Sulfat- und Zinkkonzentrationen der untersuchten Proben von den entsprechenden Werten der unbeeinflussten Betone. Angabe in Massenprozent, bezogen auf das Bindemittel.

Proben ein- gelagert in Entnahme- tiefe cm	Analysier- te Sub- stanz	Betonorte							
		BHOZ	BHOZ FA	BHOZ MS	BHOZ MSFA	BPZ	BPZ FA	BPZ MS	BPZ MSFA
Lö2 drucklos 0 - 0,5	M.% Cl <sup>-</sup>	0,223	0,314	0,448	0,392	0,376	0,457	0,470	0,152
	M.% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,54	0,24	-0,40	-0,76	2,18	0,67	0,86	-0,20
	M.% Zn <sup>2+</sup>	0,317	0,732	0,771	0,718	1,263	1,194	1,390	0,204
Lö2 10bar 0 - 0,5	M.% Cl <sup>-</sup>	0,429	0,402	0,485	0,562	0,493	0,580	0,564	0,351
	M.% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,44	0,00	-0,13	-0,16	1,74	1,17	1,35	0,16
	M.% Zn <sup>2+</sup>	1,075	1,142	0,715	0,913	1,451	1,465	1,441	0,613
Lö2 10bar 1 - 1,5	M.% Cl <sup>-</sup>	0,045	0,125	0,052	0,329	0,388	0,273	0,184	0,105
	M.% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,64	-0,39	-1,48	-0,76	0,24	-0,09	0,36	0,00
	M.% Zn <sup>2+</sup>	0,016	0,048	-0,01	0,152	0,240	0,087	0,133	0,168

Die Tabelle zeigt zunächst das Eindringen von Chlorid und Zink während der Beaufschlagung der Proben mit der Flüssigkeit LÖ2. Die größten Konzentrationen, im Vergleich zum unbeeinflussten Beton, treten in 0-0,5 cm Tiefe bei Einlagerung unter 10 bar Druck auf. Die Konzentrationen bei druckloser Einlagerung sind i.d.R. etwas kleiner. Wie zu erwarten sind die Konzentrationen in einer Probentiefe von 1-1,5 cm noch geringer. Im Falle des Sulfats treten relativ große positive und negative Werte auf. Dies ist dadurch zu erklären, daß die Änderungen der Sulfatkonzentrationen bei der Beaufschlagung klein sind gegenüber der Ausgangskonzentration von Sulfat in den Betonen. Die Meßfehler sind in diesem Falle größer als die Änderung der Sulfatkonzentration in den Proben und machen eine Interpretation der Sulfatzunahme weitgehend unmöglich. Betrachtet man die Konzentrationen in 1-1,5 cm Tiefe bei Einlagerung unter 10 bar Druck stellt man fest, daß die Chloridzunahme bei den Betonen BHOZ, BHOZFA, BHOZMS und BPZMSFA relativ klein, bei den Betonen BHOZMSFA, BPZ und BPZFA relativ groß ist. Der Beton BPZ zeigt die größte Zunahme der Chloridkonzentration. Die Unterschiede sind viel stärker ausgeprägt als in den Proben, die einer Tiefe von 0-0,5 cm entnommen wurden. Die Konzentrationen in 1-1,5 cm Tiefe spiegeln die Transportprozesse von Chlorid, sowie das Chloridbindevermögen der Betone viel stärker wieder. Die Zunahme von Zink ist bei den Betonen BHOZ, BHOZFA, BHOZMS relativ klein, bei den Betonen mit Portlandzement und dem Beton BHOZMSFA relativ groß. Auch hier zeigt der Beton BPZ die größte Zunahme der Zinkkonzentration. Die Unterschiede zwischen den Betonen sind wiederum in den Proben aus 1-1,5 cm Tiefe viel stärker ausgeprägt als in den Proben aus 0-0,5 cm Tiefe.

Zur Bewertung der chemischen Analysen kann folgendes, einfaches Modell hilfreich sein. Wenn man annimmt, daß der gesamte Porenraum der Betone mit der Flüssigkeit LÖ2 gefüllt ist, dann befinden sich in dem Beton eine ganz bestimmte Menge Chlorid, Sulfat und Zink. Die Tabelle 26 im Anhang zeigt, in welcher Größenordnung die Konzentrationen der drei Stoffe im Bindemittel der Betone liegen müßten. Die Konzentrationen der unbeeinflussten Betone sind dabei berücksichtigt.

Versucht man die gemessenen Konzentrationen mit diesem Modell zu interpretieren kommt man zu folgenden Ergebnissen. Insbesondere die Chloridkonzentrationen im Oberflächenbereich der Proben können mit diesem einfachen Modell näherungsweise erklärt werden. Ganz extrem ist die Abweichung beim Element Zink. Die Zinkkonzentrationen sind i.d.R. um mehr als eine Zehnerpotenz größer, als

nach dem Modell zu erwarten ist. Dies bedeutet, daß diese Konzentrationen nicht durch die Porenfüllung der Betone mit der Flüssigkeit LÖ2 erklärt werden können. Zink muß während der Beaufschlagung in Form eines Feststoffes in den Betonen abgeschieden werden. Wahrscheinlich sind die großen Zinkkonzentrationen auf die Ausfällung des in Kapitel 7.1.2. beschriebenen Sulfats zurückzuführen. Diese Verbindung fällt aus der Flüssigkeit LÖ2 bei pH-Wert Erhöhung aus. Nach einem Monat wird die Flüssigkeit erneuert und die Prozedur wiederholt sich. Auf diese Art und Weise wird im Porensystem des Betons additiv immer mehr dieser schwerlöslichen Zinkverbindung ausgefällt. Die Zinkkonzentration in einer Tiefe von 1-1,5 cm Tiefe sind bei dem Beton BPZ am größten. Dies ist verständlich, da die Ausfällung des Zinks in jedem Fall auf eine Erhöhung des pH-Wertes zurückzuführen ist. Der Beton BPZ besitzt den größten Calciumhydroxidgehalt und damit die größte Pufferwirkung. Die Ausfällung einer solchen Zinkverbindung wirkt porenverstopfend. Ob die Ausfällung auch treibend wirken kann, ist schwer zu sagen. Die Sulfatkonzentrationen der Betone BPZ, BPZFA und BPZFA sind etwas größer als zu erwarten und können auch nicht in dem Maße auf die Ausfällung eines Zinksulfats zurückgeführt werden. Dies könnte eventuell auf eine Gipsausfällung zurückzuführen sein. Die Sulfatkonzentrationen sind jedoch zum allergrößten Teil auf das Sulfat zurückzuführen, das von vornherein in den Betonen enthalten ist. Ungenaue Messungen des Sulfatgehaltes der unbeeinflussten Betone machen sich dabei natürlich sehr stark bemerkbar. Von daher sind diese Werte nicht sehr aussagekräftig. Die Ausfällung einer schwerlöslichen Zinkverbindung und eventuell auch von Gips würde im Einklang stehen mit der Beobachtung, daß bei den meisten Betonen bei Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ2 eine deutliche Abnahme der Sauerstoffpermeabilität zu beobachten ist.

Abschließend kann man sagen, daß die Chloridkonzentration in 1-1,5 cm Tiefe, nach fünfmonatiger Beaufschlagung mit der Flüssigkeit LÖ2 unter 10 bar Druck bei den meisten Betonen sicherlich nicht als gefährlich angesehen werden muß. Die Versuche mit der Flüssigkeit SDH haben jedoch gezeigt, daß man im Depo-niesickerwasser der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen durchaus mit einem lösenden Angriff rechnen muß, der den Chloridtransport gegenüber den hier vorgenommenen Messungen nach Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ2 deutlich beschleunigen könnte. In dem auf dieses Forschungsvorhaben aufbauenden Forschungsprojekt "Zeitrafferversuche an Beton in Deponiesickerwasser und Lebensdauerprognose für Betonbauteile in der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen" wird auf diesen Aspekt näher eingegangen.

## 7.6 Biegezugfestigkeit

Als mechanischer Kennwert zur Beurteilung des korrosiven Angriffs sollte die Biegezugfestigkeit der beaufschlagten Proben herangezogen werden. Nach der Prüfung der Sauerstoffpermeabilität konnten die beaufschlagten Proben zersägt werden. Dabei wurden Biegebalken mit den Abmessungen 8 x 5 x 3,5 cm herausgesägt. Vorversuche zur Biegezugfestigkeit entsprechender Proben hatten ergeben, daß mit solchen Probenabmessungen Bruchlasten unter 10 kN erhalten werden konnten. Der Variationskoeffizient dieser Vorversuche lag bei 13 %.

Für die Versuche wurde eine Auflagerkonstruktion mit 60 mm Stützweite hergestellt. Die Prüfungen wurden so durchgeführt, daß die Seite der Biegebalken, die der korrosiven Flüssigkeit ausgesetzt war, in der Zugzone lag. Die Versuche wurden kraft geregelt mit einer Kraftsteigerung von 50 N/s durchgeführt.

Die Biegezugfestigkeit wurde berechnet nach der Gleichung

$$\beta = F \cdot l / (b \cdot h^2)$$

Dabei ist F die Bruchlast, l die Stützweite der Auflagerkonstruktion (60 mm), b die Breite der Proben in der Zugzone und h die Höhe der Proben. Die so berechnete Biegezugfestigkeit ist nicht direkt mit der Biegezugfestigkeit nach DIN 1048 zu vergleichen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die gemessenen Werte.

Die Biegezugfestigkeit der beaufschlagten Proben ist auch im Anhang in den Abbildungen 48-51 in Diagrammform dargestellt.

Tabelle 15: Biegezugfestigkeit der Versuchsbetone nach der Beaufschlagung. Angegeben sind die Werte der Doppelbestimmung.

einge- lagert in	Betonorte							
	BHOZ	BHOZ FA	BHOZ MS	BHOZ MSFA	BPZ	BPZ FA	BPZ MS	BPZ MSFA
Wasser	5,35	5,61	3,87	4,42	6,88	6,72	5,47	5,85
	5,84	6,31	4,29	4,90	6,99	7,46	5,90	6,41
Lö1	6,20	5,00	4,36	3,88	6,23	7,28	4,97	6,29
	6,37	5,90	5,01	5,59	7,15	7,94	6,07	6,66
Lö2	5,40	5,82	4,50	4,73	6,91	6,31	5,98	5,88
	6,30	6,11	4,99	4,76	7,41	6,98	6,25	7,13
Lö2 + Org.	4,98	4,81	4,04	5,09	6,54	5,44	4,55	4,94
	5,14	6,17	4,47	5,61	7,51	6,19	5,73	5,11
Lö3	5,23	5,49	4,12	4,97	6,89	6,14	5,86	6,35
	5,79	6,39	4,36	5,18	7,25	7,19	7,12	7,10
SDH	5,96	5,67	4,81	3,69	5,33	5,25	5,67	4,89
	6,45	5,88	4,95	4,29	6,40	6,90	6,77	5,09

Die Biegezugfestigkeit von Beton wird stark von den Lagerungsbedingungen der Proben beeinflusst. Die Trocknung der Proben führt zu Schwindeigenspannungen, die das Prüfergebn verfälschen können. Da die hier verwendeten Proben natürlich über die Dauer des Forschungsprojektes stark unterschiedlichen Trocknungs- und Befeuchtungprozessen ausgesetzt wurden, soll hier nicht auf die absoluten Biegezugfestigkeiten der Betone eingegangen werden. Es soll lediglich ein Vergleich zwischen den wassergelagerten Proben und den Proben durchgeführt werden, die in den anderen Prüfflüssigkeiten gelagert wurden. Dabei sind keine signifikanten Abweichungen der Biegezugfestigkeit einer Probe von der Biegezugfestigkeit der entsprechenden wassergelagerten Probe zu erkennen. Insbesondere macht sich der lösende Angriff durch die Flüssigkeit Lö3 nicht in einer verminderten Biegezugfestigkeit der dort eingelagerten Proben bemerkbar. Ein Abfall der Festigkeit von Beton durch treibende Pro-

zesse macht sich, insbesondere bei sehr dichten Betonen, oft erst nach Jahren bemerkbar. Eine entsprechend lange Einlagerungsdauer war in diesem Forschungsprojekt nicht zu verwirklichen. Ein Anstieg der Festigkeit wie er bei treibendem Angriff typischerweise zuerst beobachtet wird, konnte bei den hier durchgeführten Experimenten allerdings nicht beobachtet werden.



## 8. DISKUSSION

Da bei den hier durchgeführten Versuchen keine Zerstörung einzelner Betone beobachtet werden konnte, muß sich die abschließende Beurteilung der verwendeten Betonrezepturen auf den Vergleich solcher Größen wie Abtragungsraten, Transportkoeffizienten usw. stützen. Dazu sind die Versuchsergebnisse noch einmal in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle 16: Übersicht über die gewonnen Versuchsergebnisse der getesteten Betonrezepturen (+ positiv, - negativ, o indifferent).

Betoneigen- schaft	Betonsorte							
	BHOZ	BHOZ FA	BHOZ MS	BHOZ MSFA	BPZ	BPZ FA	BPZ MS	BPZ MSFA
Verminderung der Hydratationswärme	o	+	o	o	o	+	o	o
Wassereindringtiefe	o	+	+	o	-	-	o	o
Trocknungsverhalten	+	+	+		o	o		o
Sauerstoffpermeabilität	o	o	-	-	o	o	o	o
Offene Porosität	o	o	-	-	o	o	-	o
Kapillare Wasseraufnahme	o	o	o	o	o	o	o	o
Äquivalenzradius $r^{0,5}$	+	+	o	-	-	-	-	-
Äquivalenzradius $r^2$	+	+	-	--	o	o	o	o
Krustenbildung in Lö2	+	+	+	+	-	o	o	o
Carbonatisierungstiefe	o	o	o	-	+	+	o	+
Beaufschlagung lö1	-	-	-	-	-	-	-	-
Beaufschlagung lö2	o	o	o	o	o	o	o	o
Beaufschlagung lö2 10bar	o	o	o	o	o	o	o	o
Beaufschlagung lö2 + Org.	o	o	o	o	o	o	o	o
Beaufschlagung lö3	--	--	--	--	--	--	--	--
Beaufschlagung SDH	-	-	-	-	-	-	-	-
Veränd. der Sauerstoffperm.	o	o	o	o	+	+	o	o
Umbildungen Phasenbestand	o	o	o	o	o	o	o	o
Chloridkonzentration	+	+	+	-	-	-	o	+
Biegezugfestigkeit	o	o	o	o	o	o	o	o

In den Flüssigkeiten LÖ3, LÖ1 und SDH konnte bei allen Betonen ein lösender Angriff beobachtet werden. Signifikante Unterschiede zwischen den Abtragungsraten der Betone konnten nicht festgestellt werden. Der lösende Angriff durch die Flüssigkeit LÖ3 war viel stärker als der Angriff durch die Flüssigkeiten LÖ1 bzw. SDH. Im Falle der Flüssigkeit LÖ3 ist der Angriff sicherlich weitgehend auf den niedrigen pH-Wert von 2,5 zurückzuführen. Im Falle der Flüssigkeiten LÖ1 und SDH spielen wahrscheinlich die austauschfähigen Salze die Hauptrolle (Ammoniakgeruch). In der Flüssigkeit SDH sind die Konzentrationen der austauschfähigen Salze zwar etwas geringer als in der Flüssigkeit LÖ1, dafür liegt hier ein etwas niedrigerer pH-Wert vor. Eventuell spielt bei Einlagerung in dieser Flüssigkeit, die einen erheblichen Anteil organischer Substanz enthielt, auch kalklösende Kohlensäure eine gewisse Rolle. Beide Flüssigkeiten erzeugen etwa gleiche Abtragungsraten. Für einen lösenden Angriff muß die festigkeitsbildende Struktur des Bindemittels, die CSH-Phasen, zerstört werden. Austauschfähige Salze wirken auf alle calciumhaltigen Komponenten des Bindemittels ein, sicher zuerst auf das Calciumhydroxid, dann auch auf die CSH-Phasen. Nach Biczok /11/ werden Traß- und Hochofenzemente oft schneller durch austauschfähige Salze angegriffen als reine Portlandzemente. Er erklärt dies über die schnellere hydrolytische Zersetzung der CSH-Phasen aufgrund der geringeren Pufferwirkung des vorhandenen Calciumhydroxids. Dies steht in Übereinstimmung mit der Beobachtung, daß Betone mit Puzzolanen bei Säureangriff oftmals keine besseren Ergebnisse zeigen als Betone ohne Puzzolane (siehe Kap. 4.1.2. und 4.1.3.). Bei unseren Versuchen konnten wir keine signifikanten Unterschiede zwischen den Betonen bei lösendem Angriff beobachten. In der Betonporenlösung ist Calciumhydroxid normalerweise nur schwer löslich. Wird die Porenflüssigkeit durch von außen eindringende Lösungen verdünnt, kann diese Löslichkeit sehr stark ansteigen. In einem solchen Fall wird natürlich der Porenraum sehr stark vergrößert, so daß Transportprozesse schneller voranschreiten können. Daher kann eine größere Calciumhydroxidkonzentration in einem Beton auch bei lösendem Angriff nachteilig sein. Diese Vergrößerung des Porenraumes wird sich bei solchen Betonen am stärksten bemerkbar machen, die von vorneherein sehr dicht sind. Bei relativ durchlässigen Betonen spielt die Vergrößerung des Porenraumes durch den lösenden Angriff keine so große Rolle für die Transportgeschwindigkeit der Schadstoffe. Die hier beobachteten Abtragungsraten durch den lösenden Angriff bei Einlagerung in die Flüssigkeiten LÖ1, LÖ3 und SDH lassen jedenfalls keine Differenzierung zwischen den untersuchten Betonen zu.

Die Gipsbildung an der Oberfläche der Betone mit Portlandzement bei Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ2 ist sicher nicht als gefährlich anzusehen. Sie zeigt jedoch, zusammen mit den DTA/TG-Analysen, die wesentlich größere Menge umsetzbaren Calciums in den Betonen mit Portlandzement. Dies kommt auch darin zum Ausdruck, daß diese Krustenbildung bei dem Beton BPZ bei Einlagerung sowohl in LÖ2, als auch in LÖ2+Org. und LÖ2 10bar am stärksten ist. Zwischen den Betonen BPZFA, BPZMS und BPZMSFA sind keine signifikanten Unterschiede in der Dicke dieser Kruste zu erkennen.

Diese Beobachtung, zusammen mit den sehr kleinen Transportkoeffizienten, der günstigen Porenradienverteilung und dem großen Widerstand gegen das Eindringen von Chlorid, läßt die Betone BHOZ und BHOZFA als die günstigsten der getesteten Rezepturen zur Verwendung im Deponiebereich erscheinen. Der Beton BHOZMS zeigt eine relativ große Sauerstoffpermeabilität, eine vergrößerte Gesamtporosität und eine etwas ungünstigere Porenradienverteilung. Dies ist bei dem Beton BHOZMSFA noch viel stärker ausgeprägt. Die Zugabe von Silikastaub bzw. die gleichzeitige Zugabe von Silikastaub und Flugasche erscheint bei Betonen mit Hochofenzement mit großem Schlackeanteil nicht sinnvoll. Die Unterschiede zwischen den Betonen BHOZ und BHOZFA sind nur graduell. Vor allem aufgrund der geringeren Wärmeentwicklung und auch des deutlich verminderten Wassereindringens scheint der Beton mit Hochofenzement und Flugasche dem Beton ohne Flugasche aber etwas überlegen zu sein. Manns et al. /35/ haben umfangreiche Untersuchungen über Beton mit hochgeschlacktem Hochofenzement mit Flugaschezusatz durchgeführt. Der Flugascheanteil betrug ebenfalls bis zu 20% am Bindemittel. Sie betrachten entsprechende Betonrezepturen zwar als brauchbar, konnten i.d.R. aber eine leichte Verschlechterung der gemessenen Beton-eigenschaften (Druckfestigkeit, Frostwiderstand, Carbonatisierung, Wasserdampfdiffusion, Porosität, Verschleißwiderstand) feststellen. Diese Versuche wurden allerdings bei konstantem Wasserbindemittelwert, nicht bei konstantem Wasserzementwert durchgeführt. Will man die positiven Auswirkungen der Flugaschezugabe auf die Dauerhaftigkeit wirklich ausnutzen, darf der Wasserzementwert nicht erhöht werden. Auch in diesem Fall ist eine wesentliche Verringerung der Zementmenge bei gleicher Konsistenz möglich. Die verwendete Flugasche sollte relativ feinkörnig sein, geringe CaO Gehalte und einen geringen Glühverlust aufweisen und einen hohen Glasanteil haben.

Die Versuche zeigen außerdem, daß einige Transportkoeffizienten (Wassereindringen, Eindringen von Chlorid) und damit auch die Dauerhaftigkeit von Beton

mit Portlandzement durch die Zugabe von Silikastaub bzw. Flugasche wesentlich verbessert werden können.

## 9. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen. Abfallgesetz (AbfG) (1986)
- /2/ Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Sonderabfall) (1990)
- /3/ Lunk, P.: Anforderungen an den Baustoff Beton hinsichtlich seiner Verwendung in der Deponietechnik. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Stahlbetonbau, TU Braunschweig (1988).
- /4/ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Sickerwasser aus Hausmüll- und Schlackendeponien. Müll Handbuch 4725, Lfg. 3/85, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- /5/ Die Zusammensetzung von Deponiesickerwässern. Arbeitsbericht der ATV Arbeitsgruppe 7.2.26 "Sickerwässer aus Industrie- und Sonderabfalldeponien". Korrospondenz Abwasser, Bd.35, H.1, S.82-87 (1988)
- /6/ Göttner, J.J.: Mögliche Reaktionen in einer Sonderabfalldeponie - Folgerungen für das Deponierungskonzept. Müll und Abfall, Bd.17, S.29-32 (1985)
- /7/ Rauscher, K., Voigt, J., Wilke, I., Wilke, K.T.: Chemische Tabellen und Rechentafeln für die analytische Praxis. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1986)
- /8/ Hodgman, C.D., Weast, R.C. (ed): Handbook of Chemistry and Physics, Bd. 66, Cleveland, Chemical Rubber Publ. Comp. (1985)
- /9/ Latscha, H.P., Klein, H.A.: Analytische Chemie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (1984)
- /10/ Knöfel, D.: Stichwort Baustoffkorrosion. 2. Aufl. Bauverlag, Wiesbaden (1982).
- /11/ Biczok, I.: Betonkorrosion, Betonschutz. 5. Aufl. Bauverlag, Wiesbaden (1968)
- /12/ Jungwirth, D.; Beyer, E.; Grübl, P.: Dauerhafte Betonbauwerke. Betonverlag (1986)
- /13/ Bijen, J.M.J.M. (ed): Maintenance and repair of concrete structures. Heron, Vol.34, No.2 (1989)
- /14/ Schneider, U.; Nägele, E.: Bauchemische Aspekte der Korrosion mineralischer Baustoffe. TIZ-Fachberichte, Bd.111, S.88-94 (1987)
- /15/ Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens, Bd.1, Anorganische Chemie. 1.Aufl. Springer Verlag, Berlin (1980)
- /16/ Calleja, J.: Durability. Sub-Theme VII-2, 7th Int. Congr. Chem. Cem., Vol.1, Paris (1980)

- /17/ Wischers, G.; Sprung, S.: Verbesserung des Sulfatwiderstandes von Beton durch Zusatz von Steinkohlenflugasche - Sachstandsbericht Mai 1989 -. Betontechnische Berichte, Beton , Nr.1, S.17-21, Nr.2, S. 62-66 (1990)
- /18/ Schröder, F.; Vinkeloe, R. et.al.: Blastfurnance slag cements + Discussion. In: V Int. Symp. on the chemistry of cement. Tokyo, 1968, Part IV, S.172-206
- /19/ ACI Committee 201: Proposed revision of: Guide to durable concrete. ACI Materials Journal. S.544-582 (1991)
- /20/ Roy, D.M., Kumar, A.; Rhodes, J.P.: Diffusion of chloride and cesium ions in portland cement pastes and mortars containing blast furnace slag and fly ash. Fly ash, Silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Proc. Second Int. Conf., Madrid, Vol.2, S.1423-1444 (1986)
- /21/ Kollek, J.J.; Lumley, J.S.: Comparative sulphate resistance of SRPC and portland slag cements. Durability of building materials and components. Proc. Fifth Int.Conf., Brighton, S.409-420 (1990)
- /22/ Schießl, P.: Wirkung von Steinkohlenflugasche in Beton. Beton, Bd.40, S.519-523 (1990)
- /23/ Mehta, P.K.: Influence of pozzolanic admixtures on the transition zone in concrete. Int. Sem. on some aspects of admixtures and industrial by-products on the durability of concrete, Session II, Göteborg (1986)
- /24/ Brodersen, H.A.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Dissertation, Aachen (1982)
- /25/ Göhring, Ch.; Riedel, W.: Gas permeability of concretes and its influence on the corrosion resistance in salt solution. Pore structure and properties of materials. Proceedings Int. Symposium, RILEM, IUPAC, Prague, Preliminary Report, Part II, S.F.95-117 (1973)
- /26/ Schubert, P.; vom Berg, W.: Steinkohlenflugasche mit Prüfzeichen als Betonzusatzstoff nach DIN 1045. Betonwerk- und Fertigteiltechnik, Bd.45, S.602-609 u. S.692-696 (1979)
- /27/ Scholz, H.: Deutsche Steinkohlen - Verbrennungsrückstände - Arten und Verwendung. Betonwerk- und Fertigteiltechnik, Bd.45, S.595-601 (1979)
- /28/ Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie. Tätigkeitsbericht 1987-1990
- /29/ Zimbelmann, R.: Verwendung von Flugasche zur Betonherstellung. Betonwerk und Fertigteil-Technik, H.11, S.705-709 (1983)
- /30/ Geiker, M.; Thaulow, N.; Andersen, P.J.: Assessment of rapid chloride permeability test of concrete with and without mineral admixtures. Durability of building materials and components. Proc. Fifth Int. Conf., Brighton, S.493-502 (1990)
- /31/ Dhir, R.K., Munday, J.G.L.; Ho, N.Y.; Tham, K.W.: Pfa in structural precast concrete: measurement of permeability. Concrete, No.12, S.4-8 (1986)

- /32/ Marsh, B.K.; Day, R.L.; Bonner, D.G.: Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash. Cement and concrete research, Vol. 15, S.1927-1038 (1985)
- /33/ Malhotra, V.M. (ed.): Supplementary cementing materials for concrete. CANMET (1987)
- /34/ Nagataki, S.; Ujike, I.: Air permeability of concretes mixed with fly ash and condensed silica fume. Fly ash, Silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Proc. Second Int. Conf., Madrid, Vol.2, S.1049-1068 (1986)
- /35/ Manns, W.; Neubert, B.; Zimbelmann, R.: Zum Einfluß von Flugasche auf die Dauerhaftigkeit von Beton aus Hochofenzement mit hohem Hüttensandgehalt. VGB Kraftwerkstechnik, Bd.70, S.244-248 (1990)
- /36/ Fiedler, J.; Theil, H.: Eiförmige Faulbehälter aus Spannbeton. Beton-Informationen. Heft 3/4, S.36-40 (1991)
- /37/ Justnes, H.; Bjorgum, J.O.; Krane, J.; Meland, I.; Skjetne, T.: The Utilization of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) in cement and concrete research. SINTEF Report No. STF65 A89071, FCB, Trondheim, Norway (1989)
- /38/ Cohen, M.D.; Bentur, A.: Durability of portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions. ACI Materials Journal, S.148-157 (1988)
- /39/ Sellevold, E.J.: Überblick über Mikrosilika in Beton. Norwegian Building Research Institute. Bericht an Elkem A/S, Elkem Chemicals, 36 S. (1984)
- /40/ Gjørsv, O.E.: Erfahrungen mit microsilicahaltigem Beton in Norwegen. Symposium über Microsilica in der modernen Betontechnologie. Konstanz, S.90-111 (1989)
- /41/ Pallotta, S.; Mantegazza, G.: Durable concrete and modern technology. Materials engineering, Vol.1, S.823-835 (1990)
- /42/ Herfurth, E.: Microsilica-Stäube als Betonzusatzstoff. Beton- und Stahlbetonbau, Bd.83, S.172-173 (1988)
- /43/ FIP-CEB Working Group on HSC: High Strenght Concrete. State of the art report (1990)
- /44/ Kordina, K.; Osteroth, H.H.; Schwick, W.: Schutz von Gewässern und Grundwasser durch dichte Betonbauteile. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig (1989)
- /45/ Durning, T.A.; Hicks, M.C.: Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemicals. Concrete International, Heft 3, S.42-48 (1991)
- /46/ Kohno, K.; Komatsu, H.: Use of ground bottom ash and silica fume in mortar and concrete. Fly ash, Silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Proc. Second Int. Conf., Madrid, Vol.2, S.1279-1292 (1986)

- /47/ Marusin, S.I.: Chloride ion penetration in conventional concrete and concrete containing condensed silica fume. Fly ash, Silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Proc. Second Int. Conf., Madrid, Vol.2, S.1119-1133 (1986)
- /48/ Gjorv, O.E.: Effect of condensed silica fume on the electrolytic conditions in concrete. Int. Sem. on some aspects of admixtures and industrial by-products on the durability of concrete, Göteborg (1986)
- /49/ Schrage, I.: Wie leistungsfähig ist hochfester Beton?. Festschrift H.Trost. RWTHAachen, S.165-177 (1991)
- /50/ Radjy, F.F.; Bogen, T.; Sellevold, E.J., Loeland, K.E.: A review of experiences with condensed silica-fume and products. Fly ash, Silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Proc. Second Int. Conf., Madrid, Vol.2, S.1135-1152 (1986)
- /51/ Malhotra, V.M. (ed.): Fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete. ACI, Montebello, Canada, Bd. 2, S.689, (1986).
- /52/ Jahrbuch des Deutschen Betonvereins 1989, S. 19
- /53/ Bomhard, H.: Flüssigkeitsdichte Behälter aus Beton - Anforderungs-, Erfüllungs- und Prüfkriterien. Berichte aus Wassergütwirtschaft- und Gesundheitsingenieurwesen der TU München, Heft 73, S.1-32 (1987)
- /54/ Gaber, K.: Einfluß der Porengrößenverteilung in der Mörtelmatrix auf den Transport von Wasser, Chlorid und Sauerstoff im Beton. Dissertation, Darmstadt (1989).
- /55/ Gräf, H.; Grube, H.: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. Beton, Bd.36, H.5, S.184-187, H.6, S.222-226. (1986).
- /56/ Gräf, H.; Grube, H.: Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit. Beton, Bd. 36, S.426-429 u. S.473-476, (1986)
- /57/ Bamforth, P.B.: The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. Mag. Concrete Res., Vol. 39, No. 138, S.3-11 (1987)
- /58/ Romberg, H.: Zementsteinporen und Betoneigenschaften. Beton-Informationen, Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut Eisenhüttenschlacken, Duisburg-Rheinhausen, S.50-55 (1978)
- /59/ Reinhardt, H.W.: Beton als Constructiematerial Eigenschappen en Duurzaamheid. Delftse Universitaire Pers (1985)
- /60/ Richartz, W.; Locher, F.W.: Ein Beitrag zur Morphologie und Wasserbindung von Calciumsilicathydraten und zum Gefüge des Zementsteins. Zement-Kalk-Gips, Bd.18, No.9, S.449-459 (1965)
- /61/ Hinrichsmeyer, K.: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton. Dissertation, Braunschweig (1987)



/62/ Kropp, J.: Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein. Dissertation, Karlsruhe (1983)

## 10. ANHANG

### 10.1 Kurze Erläuterungen zu den verwendeten chemisch-physikalischen Analyseverfahren

#### 10.1.1 Quecksilberdruckporosimetrie (MIP)

Bei der Quecksilberdruckporosimetrie wird die Oberflächenspannung des Quecksilbers und der Benetzungswinkel mit dem zu untersuchenden Werkstoff benutzt, um die Radien der Poren zu berechnen, in die das Quecksilber unter Aufbringung eines stetig steigenden Druckes hineingepresst wird /44/.

#### 10.1.2 Differentialthermoanalyse und -gravimetrie (DTA/TG)

Bei der Differentialthermoanalyse/-gravimetrie wird das Gewicht einer Probe, die Änderung des Gewichts mit der Zeit, sowie die Temperaturdifferenz zwischen der Probe und einer inerten Referenzprobe während eines Aufheiz- oder Abkühlzykluses bestimmt. Dabei kann einerseits die Aufnahme bzw. die Abgabe gasförmiger Substanzen in Abhängigkeit von der Temperatur durch die Gewichtsänderung der Probe gemessen werden. Andererseits können Reaktionsenthalpien chemischer Reaktionen durch die Temperaturdifferenz gegenüber einer Inertsubstanz in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen werden.

#### 10.1.3 Sauerstoffpermeabilität System VDZ

Die Sauerstoffpermeabilität wird geprüft, indem eine abgedichtete Materialprobe auf einer Seite mit Sauerstoff unter definiertem Druck beaufschlagt wird und auf der anderen Seite die hindurchgetretene Durchflußmenge in Abhängigkeit vom Eingangsdruck gemessen wird. Bei der Apparatur nach dem System VDZ (Forschungsinstitut des Vereins der Deutschen Zementwerke) wird die Probe durch eine PUR Manschette mit aufblasbarem Gummischlauch seitlich abgedichtet.

#### 10.1.4 Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD)

Das Prinzip der Röntgenpulverdiffraktometrie besteht darin, daß bei der Beugung von monochromatischen Röntgenstrahlen an den Netzebenen von Kristallen eine substanzspezifische Verteilung von Beugungsmaxima in Abhängigkeit vom Beugungswinkel  $2\text{-}\Theta$  meßbar ist, die zur qualitativen und quantitativen Phasenanalyse herangezogen werden kann.

#### 10.1.5 Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)

Bei der Atomabsorptionsspektroskopie muß die Materialprobe flüssig vorliegen. Für feste Substanzen werden dafür verschiedene Aufschlußverfahren angewandt. Die Lösung wird in einer Flamme verdampft, so daß im Idealfall alle Stoffe in atomarer Form vorliegen. Diese Flamme wird mit Licht durchstrahlt. Die Atome in der Flamme absorbieren je nach ihrer Elektronenkonfiguration auf element-spezifischen Wellenlängen. Die Absorption des eingestrahlt Lichts an diesen Wellenlängen wird zur Konzentrationsbestimmung der entsprechenden Elemente in der Lösung benutzt.

#### 10.1.6 Korngrößenbestimmung mit Hilfe eines Laser Granulometers

Bei der Korngrößenbestimmung mit Hilfe eines Laser-Granulometers wird eine Suspension, die die entsprechende Substanz fein verteilt enthält, mit einem Laser durchstrahlt. Anhand des Beugungsbildes kann eine Korngrößenverteilung berechnet werden. Wie bei allen Korngrößenanalysen muß man beachten, daß es keine absoluten Korngrößen gibt. Man mißt immer nur eine Äquivalenzkorngröße, die von der Meßmethode abhängig ist.

## 10.2 Tabellen und Abbildungen

Tabelle 17: Positiv-Negativ-Liste der in Hoheneggelsen eingelagerten Stoffe.

Niedersächsische  
Sonderabfalldeponie  
Hoheneggelsen GmbH



Auszug aus dem Planfeststellungsbeschuß vom 14. 10. 1985 zur Erweiterung der Sonderdeponie Hoheneggelsen.

### Positiv/Negativkatalog der Sonderdeponie Hoheneggelsen

#### Zugelassene Abfälle

60.) Abgelagert werden dürfen – soweit nicht nach Pkt. Nr. 61.) von der Ablagerung ausgeschlossen und soweit die Nebenbestimmungen dieses Beschlusses erfüllt sind:

- a) Abfälle, die von den beseitigungspflichtigen Körperschaften nach § 3 Abs. 3 AbfG wegen ihrer Art ausgeschlossen worden sind
- b) Altlasten
- c) Verunreinigte Böden und Bauwerke

61.) Nicht abgelagert werden dürfen:

- a) Abfälle, die in anderen dafür geeigneten Anlagen artspezifisch beseitigt werden müssen.
- b) Abfälle mit flüssiger, schlammiger oder pastöser Konsistenz.
- c) Abfälle, die erst durch Zumischen von saugfähigen und/oder anderen Materialien bzw. Abfällen die Voraussetzungen zur Ablagerung erfüllen. Ausgenommen hiervon sind verfestigte Abfälle, bei denen durch chemische und/oder physikalische Prozesse eine Fixierung der Schadstoffe erfolgt.
- d) Abfälle mit einem Glühverlust (550°C, bezogen auf TR) von mehr als 40 Gewichtsprozent (Gew. %). Ausnahmen sind zulässig, soweit die Beseitigung dieser Abfälle auf thermischem Wege oder andere Art nachweislich nicht möglich ist.
- e) Abfälle, die penetrant riechen.
- f) Abfälle, die mit Feuchtigkeit unter merklicher Wärme- und/oder Gasentwicklung reagieren.
- g) Abfälle, die nach DIN 38414-S4 mehr als 10 Gew. % wasserlöslich sind, sowie Flugaschen, die mehr als 15 Gew. % wasserlöslich sind.
- h) Abfälle, die zum Zeitpunkt der Anlieferung noch nicht ausreagiert haben.
- i) Abfälle, die wegen Anteilen von instabilen, leicht reaktionfähigen oder zur Explosion neigenden Stoffen einen sicheren Deponiebetrieb in Frage stellen.
- j) Abfälle, die Kampfstoffe, Explosions- oder Sprengmittel enthalten, insbesondere chemische oder biologische Kampfstoffe.
- k) Abfälle, die dem Tierkörperbeseitigungsgesetz unterliegen sowie sonstige Tierkörper und Kadaver.
- l) Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe im Sinne des Atomgesetzes.

m) Hausmüll, hausmüllähnliche Abfälle und Bauschutt. Davon ausgenommen sind Bauschutt und Straßenaufbruch zu Betriebszwecken (beispielsweise Wegebefestigung/Zwischenabdeckung).

n) Abfälle, die als hochgiftige Stoffe gem. den Kriterien der Technischen Regeln für gefährliche Arbeitsstoffe (TRGA 110) anzusehen sind. Ausnahmen sind nach Einzelbewertung möglich.

o) Unter Über- oder Unterdruck stehende Behälter.

p) Abfälle aus galvanischen Prozessen mit einem Cyanidgehalt (leicht freisetzbar) von mehr als 1 mg/kg Originalsubstanz (OS). Ausnahmen sind nach Einzelbewertung möglich. Bei Abfällen aus nicht galvanischen Prozessen kann ein Cyanidgehalt (leicht freisetzbar) bis zu 10 mg/kg OS zugelassen werden.

q) Abfälle aus galvanischen Prozessen mit einem Chromatgehalt von mehr als 10 mg/kg OS.

r) Abfälle, die Quecksilber oder seine Verbindungen in Konzentrationen über 0,5 Gew. % enthalten, ausgenommen Batterien bis zu einem Quecksilbergehalt von 2 Gew. % und Quecksilber in sulfidischer Bindung.

s) Abfälle, die im Eluat nach DIN 38414-S4 wasserlösliche Arsenverbindungen von mehr als 10 mg/l, wasserlösliche Cadmiumverbindungen von mehr als 5 mg/l oder wasserlösliche Quecksilberverbindungen von mehr als 1 mg/l enthalten.

t) Abfälle, die einen Flammpunkt kleiner als 21°C aufweisen.

u) Abfälle, die organische Lösemittel (halogenfrei) in Konzentrationen über 3 Gew. % der OS enthalten.

v) Abfälle, die mehr als 0,1 Gew. % der OS mehrfach halogenierte Substanzen enthalten, die gemäß der Arbeitsstoffverordnung als giftig (T) oder gesundheitsschädlich (Xn) eingestuft sind, ausgenommen sind halogenierte Lösemittel in Konzentrationen bis zu 0,5 Gew. % der OS.

w) Abfälle, die Benzine, Öle oder Fette von mehr als 15 Gew. % der OS enthalten. Die Überwachungsbehörde kann Ausnahmen davon zulassen, wenn verunreinigte Böden und/oder Bauwerke aufgrund ordnungsbehördlicher Verfügung beseitigt werden müssen.

Die Überwachungsbehörde kann über die vorstehende Aufzählung hinaus im Einzelfall zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit bestimmte Abfälle von der Ablagerung ausschließen.

Tabelle 18: Chemische Zusammensetzung der Deponiesickerwässer der Sonderabfalldeponie Hoheneggelsen. Zum Vergleich Daten anderer Deponien.

	Einheit	Hoheneggelsen		Vergleichswerte anderer Deponien	
		Min.	Max.	Min.	Max.
ph Wert		4,5	12,5	3,5	11,6
Leitfähigkeit 1)	µS/cm	2600	17800	2000	100000
Abdampfrückstand	mg/l	2590	47800	300	50000
Glührückstand	mg/l	270	36900	800	20000
Säurekapazität	mmol/l		3,2	0	250
Basekapazität	mmol/l		845		
Ammonium	mg/l N	<0,04	446	<5	6036
Nitrit	mg/l N	<0,02	0,65	0	131
Nitrat	mg/l N	<0,5	10,4	0	14775
Gesamter Stickstoff	mg/l			5	4000
Gesamter Phosphor	mg/l			0,01	52
Sauerstoffgehalt	mg/l O <sub>2</sub>	1	16,4	0	10
DOC (gel.org.Kohlenst.)	mg/l	14	10700	120	22000
Kaliumperman.verbr.	mg/l	82	1900	50	10000
CSB	mg/l	58,2	65500	50	60000
BSB5	mg O <sub>2</sub> /l	<3	14600	<1	45000
Sulfidschwefel	mg/l S	<0,1	0,245		<0,2
Cyanid gesamt	mg/l	<0,04	36,7	0,0	15
Cyanid l. freisetzbar	mg/l	<0,02	0,08	0,0	1
Fluorid	mg/l	0,53	2500	<0,1	50
Gesamthärte	mmol/l	1,04	24,8	10,8	90
	°dH	5,82	139	60	504
Calcium	mg/l	96	2590	30	2500
Kalkaggressive Kohlens.	mg/l			0	200
Magnesium	mg/l	0,662	1090	50	2000
Chlorid 1)	mg/l	111	13600	36	36146
Sulfat	mg/l	<0,5	12700	18	14968
Natrium	mg/l	126	10200	50	8200
Kalium	mg/l	29	1460	10	10000
Eisen 1)	mg/l	<0,1	2470	0,38	1000
Mangan	mg/l	<0,1	1900	1	75

	Einheit	Hoheneggelsen		Vergleichswerte anderer Deponien	
		Min.	Max.	Min.	Max.
Chrom 1)	mg/l	<0,01	236	<0,009	35
Kupfer	mg/l	<0,005	16,52	0,0013	8
Nickel	mg/l	0,03	7,34	0,0142	30
Zink	mg/l	0,002	2000	<0,05	27,242
Blei	mg/l	0,04	1,05	<0,1	1
Cadmium	mg/l	<0,001	37	0,001	2
Quecksilber	mg/l	<0,0006	0,045	0,00017	0,05
Antimon	mg/l	0,003	0,55		
Arsen	mg/l	<0,003	39	<0,0001	1
Barium	mg/l	8,74	177		
Bor	mg/l	0,1	30		
Kobalt	mg/l	<0,02	5		
Vanadium	mg/l	0,03	1,79		
AOX 1)	µg/l	0,00022	3600	44	36500
IR KW Heizöl	mg/l	<0,02	1		
IR KW Normalbenzin	mg/l	<0,02	1,75		
Summe PCB Isomere	µg/l	<0,06	0,27		
Summe PCB Chlophen	µg/l	<0,5	1,37		
Dichlormethan	µg/l	0,01	2370	64	36500
Trichlormethan	µg/l			1	710
Chloroform	µg/l	<0,001	600		
1,1,1 Trichlorethan	µg/l	0,0003	306	<0,4	1000
1,1,2 Trichlorethan	µg/l			<0,4	1000
Tetrachlormethan	µg/l	<0,0001	2	0,6	270
1,1,1,2 Tetrachlorethan	µg/l			<0,01	775
SBV	mval/l	2,9	134		
LBV	mval/l	0,5	328		
Sulfid H <sub>2</sub> S	mg/l	<0,03	8,3		
Thiocyanat	mg/l	<0,2	3900		
Selen	mg/l	0,008	0,175		
Tellur	mg/l	<0,001	0,209		
Chrom 6-wertig	mg/l	<0,1	136		
1,2 Dichlorethan	µg/l	25	2460	<4	290
Summe PAK	µg/l	0,05	8,91	0,02	1

	Einheit	Hoheneggelsen		Vergleichswerte anderer Deponien	
		Min.	Max.	Min.	Max.
Trichlorethylen	µg/l	31	273	<0,01	775
1,2 Dichlorpropan	µg/l	<1	148		
Tetrachlorethylen	µg/l	14	100		
Perchlorethylen	µg/l			1	7430
1,2,3 Trichlorpropan	µg/l	<1	2160		
Benzol	µg/l	145	29200		
Toluol	µg/l	<1	15200		
Xylol	µg/l	28,7	5800		
1,4 Dichlorbenzol	µg/l	<1	426		
1,2 Dichlorbenzol	µg/l	<0,1	651		
Hexachlorbutadien	µg/l	<1	44		
Alpha HCH	µg/l	0,2	1300	0,0	0,1
Beta HCH	µg/l	<0,1	1500		
Gamma HCH	µg/l	0,2	1200		
HCH Isomere	µg/l				
Hexachlorbenzol	µg/l	<0,1	1400		
Aldrin	µg/l	<0,1	0,5		
Dieldrin	µg/l	<0,1	0,3		
4,4 DDE	µg/l	<0,1	1,3		
Methoxychlor	µg/l	<0,1	8,6		
Pentachlorphenol	µg/l	0,3	152		
2,4,5-T-säure u.-ester	µg/l	<0,2	346		
Summe Dichlorphenole	µg/l	3	181		
Summe Trichlorphenole	µg/l	2,5	192	0,001	1
Phenol Gesamt	mg/l				
Gesamtphenolindex	mg/l	<0,003	227		
2,4,5 Trichlorphenol	µg/l	0,5	128		
Schwefelwasserstoffe	mg/l	<0,05	36,5	0	80
Kohlenwasserstoffe 1)	mg/l	<0,1	84,6	<0,1	20
TOC (ges.org.Kohlenst.)	g/l	0,1	16,3	0,01	25

1) In "Altdeponien" Leitfähigkeiten bis 183000 µS/cm, Chlorid bis 126,3 g/l, Eisen bis 2,7 g/l, Chrom bis zu 300 mg/l, AOX bis 292 mg/l und Kohlenwasserstoffe bis 424 mg/l.

Tabelle 19: Zur Synthese der Beaufschlagungsflüssigkeiten verwendete Chemikalien.

Calciumchlorid-Dihydrat z.A. Merck 2382  
 Magnesiumsulfat-Heptahydrat z.A. Merck 5886  
 Eisen(II)-sulfat-Heptahydrat z.A. Merck 3965  
 Mangan(II)-sulfat-Monohydrat z.A. Merck 5963  
 Chrom(III)-nitrat-Nonahydrat z.A. Merck 2481  
 Kupfer(II)-sulfat-Pentahydrat z.A. Merck 2790  
 Nickel(II)-chlorid-Hexahydrat z.A. Merck 6717  
 Zinksulfat-Heptahydrat z.A. Merck 8883  
 Blei(II)-chlorid wasserfrei zur Synthese Merck 807383  
 Bariumfluorid Suprapur Merck 1722  
 Cobalt(II)-sulfat-Heptahydrat z.A. Merck 2556  
 Ammoniumsulfat z.A. Merck 1217  
 Natriumchlorid z.A. Merck 6404  
 Natriumsulfat-Decahydrat z.A. Merck 6648  
 Kaliumnitrit z.A. Merck 5067  
 Kaliumchlorid z.A. Merck 4936  
 Kaliumsulfid z.A. Merck 5134  
 Borsäure z.A. Merck 165  
 Magnesiumchlorid-Hexahydrat reinst Merck 5832  
 Bariumchlorid-Dihydrat z.A. Merck 1719  
 1,2,3 Trichlorpropan zur Synthese Merck 821159  
 Dichlormethan z.A. Merck 6050  
 1,2 Dichlorethan zur Synthese Merck 822346  
 Toluol zur Synthese Merck 818765  
 Xylol zur Synthese Merck 818754  
 n-Decan zur Synthese Merck 803405  
 n-Hexan zur Synthese Merck 822280



Tabelle 20. Chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente. Angaben in Masseprozent.

	PZ 35 L-NW/HS		HOZ 35 L-NW/HS/NA	
	Werks- angabe Glühver- lustfrei	eigene Analyse incl. Glüh- verlust	Werks- angabe incl. Glüh- verlust	eigene Analyse incl. Glüh- verlust
unlös. Rückst.		0,60	0,31	0,50
SiO <sub>2</sub>	21,4	20,7	27,56	28,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0	4,28	10,70	13,81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,8	6,48	0,79	0,78
CaCO <sub>3</sub>	62,1			
CaO		60,74	47,97	44,13
MgO	1,4	1,21	6,22	7,67
SO <sub>3</sub>	3,1	2,84	2,79	2,58
S			1,18	
TiO <sub>2</sub>		0,29		0,73
Na <sub>2</sub> O		0,47	0,30	0,09
K <sub>2</sub> O	0,8	0,75	0,64	0,89
Cl		<<0,01		<0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,10		0,02
MnO		0,17		0,03
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0,15	
PbO		0,01		<<0,01
ZnO		<<0,01		0,01
CaS			2,66	
CaSO <sub>4</sub>			4,74	
fr. CaO			0,53	
Kalk (Rest)			43,95	
F			2,21	
Ges. Alkal.			0,72	

	PZ 35 L-NW/HS		HOZ 35 L-NW/HS/NA	
	Werks- angabe	eigene Analyse	Werks- angabe	eigene Analyse
Glühverlust	2,4	2,59	1,08	1,01
Reindichte g/cm <sup>3</sup>	3,22	3,18	2,95	2,90
Blaine cm <sup>2</sup> /g	3300	2730	3900	3840
Schlackegehalt			76	72
Potentieller Phasenbestand nach Bogue	C <sub>3</sub> S 51,9 % C <sub>2</sub> S 20,2 % C <sub>3</sub> A 0,38 % C <sub>4</sub> AF 19,7 %			

Tabelle 21. Chemische Zusammensetzung der verwendeten Flugasche und des verwendeten Silikastaubes. Alle Angaben in Masseprozent, incl. Glühverlust.

	Flugasche KM/C Baumineral Herten		Mikrosilica Suspension MS-S 500 S, Fa. Elkem	
	Werks- angabe	eigene Analyse	Werks- angabe	eigene Analyse
Salzsäureunl.	63,1-68,5	65,61		77,80
SiO <sub>2</sub>	49,5-51,5	11,97	91,6-92,9	20,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,8-27,8	8,75	0,80-1,5	0,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,2-8,3	4,11	0,52-0,63	0,10
CaO	3,04-4,03	5,20	0,29-0,37	0,04
MgO	1,82-4,03	1,04	0,54-0,62	0,12
SO <sub>3</sub>	0,44-1,01	0,96	0,17-0,37	0,10
TiO <sub>2</sub>		0,33		0,19
Na <sub>2</sub> O	0,9-1,03	0,19	0,19-0,24	0,09
K <sub>2</sub> O	4,15-4,22	2,79	0,71-0,79	0,83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			0,07-0,08	
Cl	<0,01	<0,01	0,05-0,1	0,05
MnO		0,05		<<0,01
PbO		0,03		0,02
ZnO		0,03		0,02
CaO <sub>frei</sub>	0,10-0,42			
Glühverlust	0,5-5,0	0,78	2,18-2,26	1,45
Dichte g/cm <sup>3</sup>			1,38-1,39	
Reindichte g/cm <sup>3</sup>	2,17-2,37	2,38		2,20 (trocken)
Blaine cm <sup>2</sup> /g	2630			
kg Feststoff pro kg Suspension			0,51-0,52	0,489

Die Werksanalyse beziehen sich auf einen längeren Zeitraum, deshalb sind die Schwankungsbereiche während dieser Zeitspanne angegeben. Die eigenen chemischen Analysen sind nicht besonders aussagekräftig, da nur der Teil der Substanzen analysiert wurde, der im Salzsäureaufschluß gelöst werden konnte.

Tabelle 22: Korngrößenverteilung der verwendeten Zemente und Zusatzstoffe nach Werksangaben.

HOZ 35 L NW/HS/NA		PZ 35 L NW/HS		Flugasche KM/C Sympatec Helos Partikelgrößenanalyse			
Korn- größe µm	Durch- gang Prozent	Sieb µm	Rück- stand Proz.	Korn- größe µm	Durch- gang Prozent	Korn- größe µm	Durch- gang Prozent
1	6,4	30	24	0,9	2,3-3,0	12,5	51,2-57,5
1,5	8,0	90	0,7	1,1	3,6-4,6	15,0	55,8-62,4
2	11,7	Flugasche KM/C		1,3	4,9-6,3	18,0	60,4-67,1
3	16,8			1,5	6,3-8,0	21,0	64,4-70,9
4	21,5			1,8	8,3-10,5	25,0	69,2-74,9
6	28,7			2,2	11,1-13,9	30,0	74,8-78,9
8	35,1	Sieb µm	Rück- stand Prozent	2,6	13,7-17,1	36,0	80,8-82,9
12	45,8			3,1	16,9-20,8	43,0	86,3-86,7
16	56,3			3,7	20,4-24,9	51,0	90,1-90,7
24	73,0			4,3	23,6-28,5	61,0	93,2-94,2
32	83,5	20	29-54	5,0	27,0-32,3	73,0	95,8-96,9
48	96,5			6,0	31,5-37,2	87,0	98,0-98,9
64	97,8			7,5	37,5-43,5	103,0	99,5-100,0
96	99,6			9,0	42,6-48-7	123,0	100,0-100,0
128	100	40	16-37	10,5	46,7-52,9	147,0	100,0-100,0
						175,0	100,0-100,0

Tabelle 23: Kennwerte zur Gaber'schen Theorie.

	Äquivalenzradien in nm				Potenzierte Äquivalenzradien			
	$r_{0,5}$	$r$	$r_{1,5}$	$r_2$	$r^{0,5}$	$r$	$r^{1,5} \cdot 10^3$	$r^2 \cdot 10^4$
BHOZ	39,0	75,2	127	181	6,22	75,2	1,47	3,55
BHOZFA	37,7	73,1	125	183	6,14	73,1	1,41	3,40
BHOZMS	51,2	116	204	290	7,15	116	2,92	8,48
BHOZMSFA	82,4	186	306	418	9,04	186	5,43	18,1
BPZ	85,6	136	196	257	9,25	136	2,75	6,63
BPZFA	97,6	150	205	257	9,87	150	2,95	6,70
BPZMS	86,4	137	196	253	9,28	137	2,76	6,52
BPZMSFA	77,8	134	199	262	8,81	134	2,83	7,04
	kum. Vol. Hg in mm <sup>3</sup> /g		Trockenroh- dichte in g/cm <sup>3</sup>		$\epsilon_{Hg}$ Vol. %	$\epsilon_v$ Vol. %	$\epsilon_v^{-0,25}$	$\epsilon_k$ Vol. %
BHOZ	46,0 ± 5,8		2,213 ± 0,017		9,4	1,9	0,852	7,5
BHOZFA	42,5 ± 2,3		2,231 ± 0,013		9,5	1,5	0,904	8,0
BHOZMS	46,9 ± 2,1		2,165 ± 0,022		10,1	2,5	0,795	7,6
BHOZMSFA	48,2 ± 2,4		2,172 ± 0,019		10,5	2,195	0,822	8,3
BPZ	40,4 ± 2,9		2,275 ± 0,012		9,2	2,0	0,841	7,2
BPZFA	40,3 ± 2,6		2,279 ± 0,017		9,2	1,65	0,882	7,5
BPZMS	51,0 ± 3,2		2,217 ± 0,022		11,3	1,97	0,844	9,3
BPZMSFA	43,9 ± 1,7		2,218 ± 0,023		9,7	2,35	0,808	7,4
	$\epsilon$ Vol. %	$\epsilon^{1,5}$	$\epsilon^8 \cdot 10^7$	$w$ M. %	$e^{-0,7w}$			
BHOZ	8,4	24	2,5	3,8	0,0699			
BHOZFA	8,7	26	3,3	3,9	0,0652			
BHOZMS	8,8	26	3,6	5,1	0,0282			
BHOZMSFA	9,3	28	5,7	5,4	0,0228			
BPZ	8,1	23	1,9	2,9	0,1313			
BPZFA	8,3	24	2,3	3,3	0,0993			
BPZMS	10,3	33	12,4	4,2	0,0529			
BPZMSFA	8,5	25	2,7	4,0	0,0608			

Tabelle 24: Äquivalenzradien nach Beaufschlagung.

Einlagerung in		BHOZ	BHOZ FA	BHOZ MS	BPZ	BPZ FA	BPZ MS
Ausgangs- werte	$r^{0,5}$	6,22	6,14	7,15	9,25	9,87	9,28
		$\pm 0,56$	$\pm 0,19$	$\pm 0,31$	$\pm 0,18$	$\pm 0,26$	$\pm 0,57$
	$r^2 \cdot 10^4$	3,6	3,40	8,5	6,6	6,7	6,5
		$\pm 1,9$	$\pm 0,78$	$\pm 1,6$	$\pm 1,0$	$\pm 1,4$	$\pm 1,7$
Wasser	$r^{0,5}$	7,50	6,86	7,70	8,47	7,88	7,42
		8,02	6,87	7,75	9,96	10,5	8,19
	$r^2 \cdot 10^4$	8,21	4,51	10,8	5,78	5,58	6,05
		15,6	4,98	11,2	12,4	17,5	10,4
Lö2	$r^{0,5}$	6,99	6,98	7,86	9,37	8,17	8,44
		8,05	8,49	8,46	10,7	8,20	8,76
	$r^2 \cdot 10^4$	6,97	4,13	17,4	9,32	5,94	10,0
		11,6	10,5	19,4	19,4	5,94	14,0
Lö2 10 bar	$r^{0,5}$	5,98	5,74	6,87	8,56	7,11	6,30
			6,05		9,40	7,16	6,82
	$r^2 \cdot 10^4$	5,80	2,61	7,02	4,23	2,31	3,28
			4,51		7,95	2,50	3,40
Lö1	$r^{0,5}$				9,89		
	$r^2 \cdot 10^4$				10,9		
Lö3	$r^{0,5}$		8,00		9,45		
			8,83		9,67		
	$r^2 \cdot 10^4$		9,42		8,85		
			16,9		11,4		

Tabelle 25: Konzentration von Chlorid, Sulfat und Zink in den Versuchsbetonen nach der Beaufschlagung durch die Flüssigkeit Lö2, sowie in den unbeaufschlagten Betonen (Referenzwerte). Obere Zahlenwerte: Angabe in Masseprozent, bezogen auf den Beton. Untere Zahlenwerte: Angabe in Masseprozent, bezogen auf das Bindemittel.

Proben eingelagert in Entnahmetiefe cm	Analysierte Substanz	Betonsorte							
		BHOZ	BHOZ FA	BHOZ MS	BHOZ MSFA	BPZ	BPZ FA	BPZ MS	BPZ MSFA
unbeeinflußter Beton Kernbeton	M.% $\text{Cl}^-$	0,009	0,005	0,009	0,005	0,004	0,008	0,003	0,004
		0,037	0,020	0,034	0,017	0,016	0,030	0,011	0,014
	M.% $\text{SO}_4^{2-}$	0,90	0,84	1,15	1,22	0,82	0,79	0,71	0,78
		3,71	3,38	4,30	4,07	3,30	2,96	2,66	2,63
	M.% $\text{Zn}^{2+}$	0,004	0,008	0,010	0,008	0,006	0,005	0,004	0,008
		0,017	0,032	0,039	0,027	0,026	0,018	0,015	0,027
Lö2 drucklos 0 - 0,5 cm	M.% $\text{Cl}^-$	0,063	0,083	0,129	0,123	0,097	0,13	0,128	0,049
		0,260	0,334	0,481	0,409	0,392	0,487	0,481	0,166
	M.% $\text{SO}_4^{2-}$	0,77	0,90	1,04	1,00	1,36	0,97	0,94	0,72
		3,16	3,62	3,90	3,31	5,48	3,64	3,52	2,43
	M.% $\text{Zn}^{2+}$	0,081	0,190	0,217	0,224	0,319	0,324	0,374	0,068
		0,334	0,764	0,810	0,745	1,289	1,212	1,405	0,231
Lö2 10 bar 0 - 0,5 cm	M.% $\text{Cl}^-$	0,113	0,105	0,139	0,174	0,126	0,163	0,153	0,108
		0,466	0,422	0,519	0,578	0,509	0,610	0,575	0,365
	M.% $\text{SO}_4^{2-}$	1,01	0,84	1,12	1,18	1,25	1,10	1,07	0,83
		4,15	3,38	4,16	3,91	5,04	4,13	4,02	2,80
	M.% $\text{Zn}^{2+}$	0,265	0,292	0,202	0,283	0,366	0,396	0,387	0,190
		1,092	1,174	0,754	0,940	1,478	1,483	1,456	0,640
Lö2 10 bar 1 - 1,5 cm	M.% $\text{Cl}^-$	0,020	0,036	0,023	0,104	0,100	0,081	0,052	0,035
		0,082	0,145	0,086	0,346	0,404	0,303	0,196	0,118
	M.% $\text{SO}_4^{2-}$	0,74	0,74	0,76	1,00	0,88	0,77	0,80	0,78
		3,07	2,99	2,82	3,31	3,54	2,88	3,02	2,63
	M.% $\text{Zn}^{2+}$	0,008	0,020	0,009	0,054	0,066	0,028	0,039	0,058
		0,033	0,080	0,034	0,179	0,266	0,105	0,148	0,195

Tabelle 26: Zu erwartende Konzentration von Chlorid, Sulfat und Zink in den Versuchsbetonen, wenn der gesamte Porenraum durch die Flüssigkeit LÖ2 gefüllt wäre. Oberer Wert: Angabe in Massenprozent bezogen auf den Beton. Unterer Wert: Angabe in Massenprozent bezogen auf das Bindemittel.

	BHOZ	BHOZ FA	BHOZ MS	BHOZ MSFA	BPZ	BPZ FA	BPZ MS	BPZ MSFA
M.% $\text{Cl}^-$	0,101 0,415	0,096 0,385	0,119 0,442	0,113 0,374	0,089 0,360	0,092 0,346	0,105 0,396	0,098 0,331
M.% $\text{SO}_4^{2-}$	0,99 4,06	0,92 3,72	1,25 4,68	1,32 4,40	0,90 3,62	0,87 3,26	0,80 3,02	0,87 2,93
M.% $\text{Zn}^{2+}$	0,018 0,072	0,021 0,086	0,027 0,099	0,024 0,079	0,019 0,077	0,017 0,065	0,019 0,072	0,022 0,074



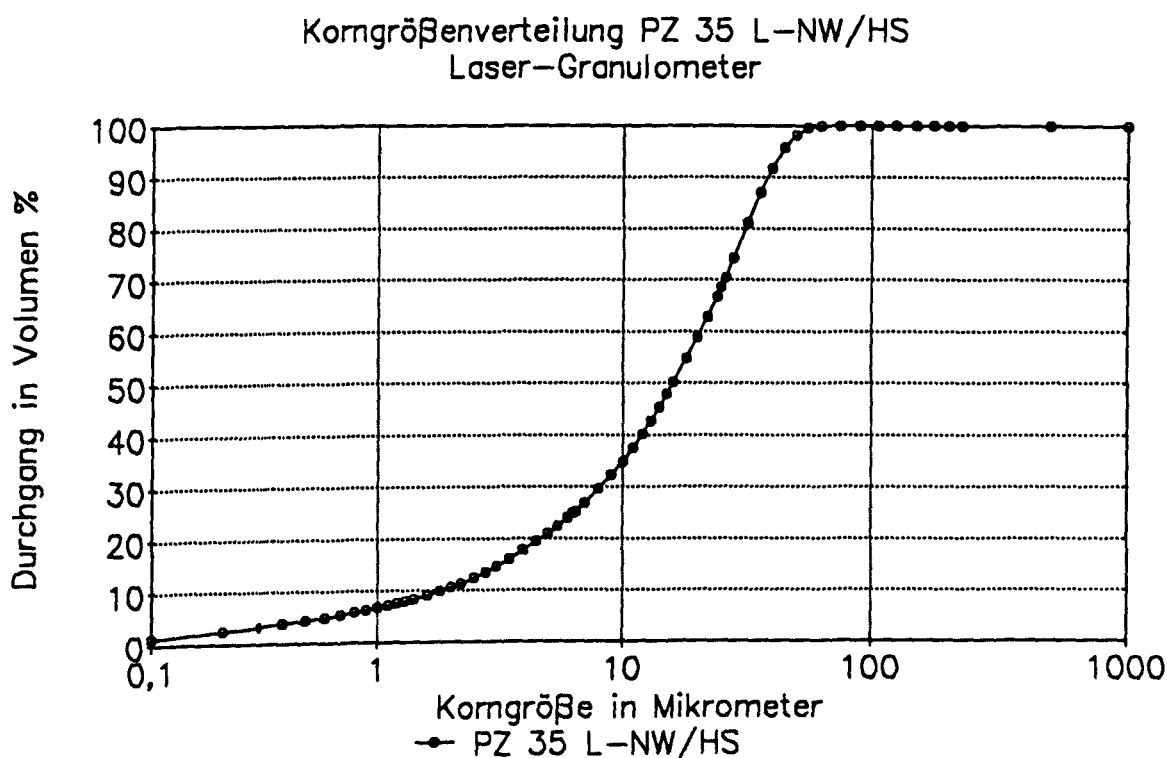
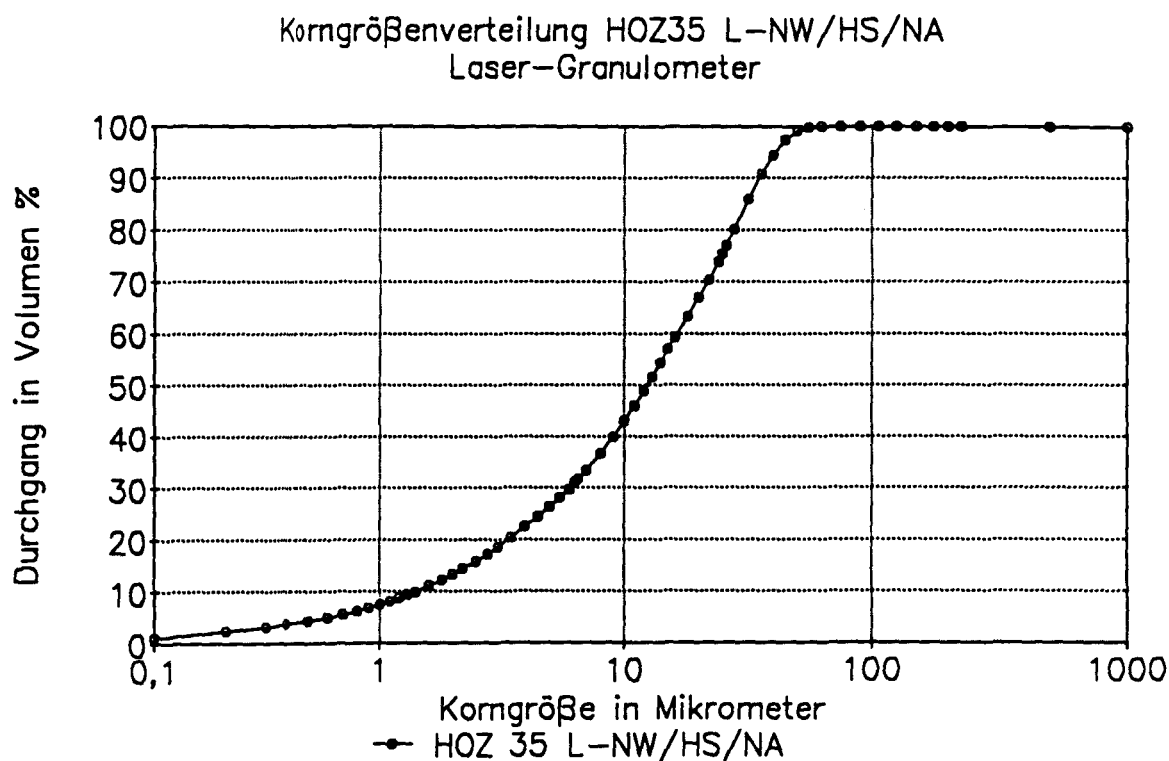
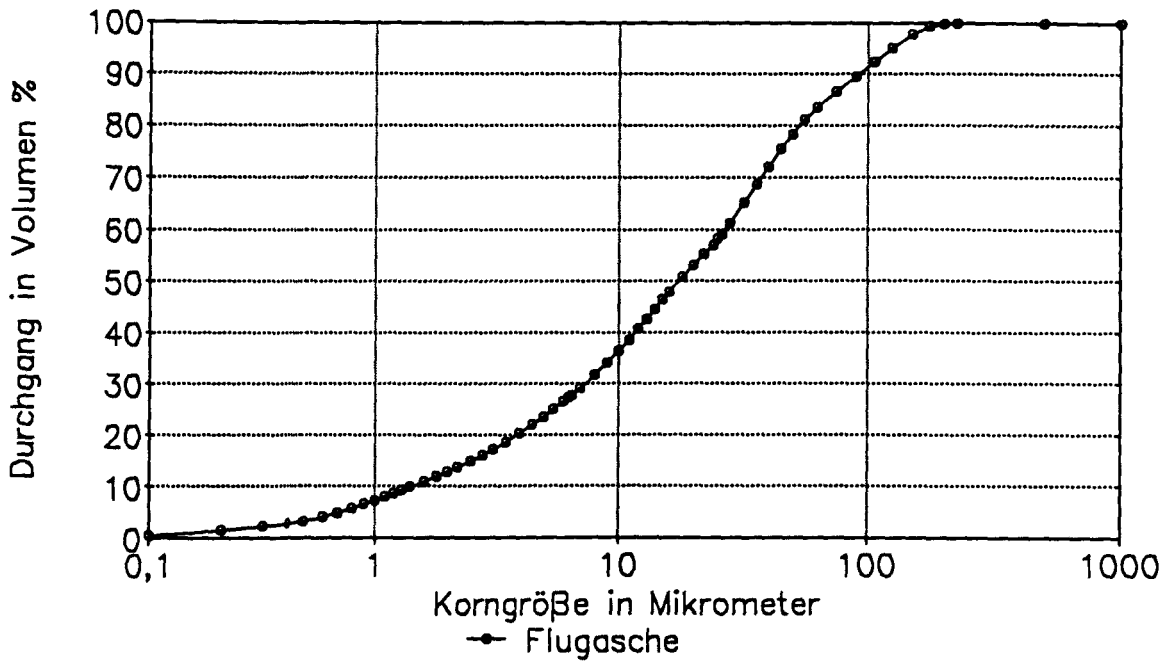


Abbildung 1: Oben: Korngrößenverteilung des Zementes HOZ 35L-NW/HS/NA nach eigenen Untersuchungen. Unten: Korngrößenverteilung des Zementes PZ 35 L-NW/HS nach eigenen Untersuchungen.

Korngrößenverteilung Flugasche  
Laser-Granulometer



Korngrößenverteilung Silikastaub  
Laser-Granulometer

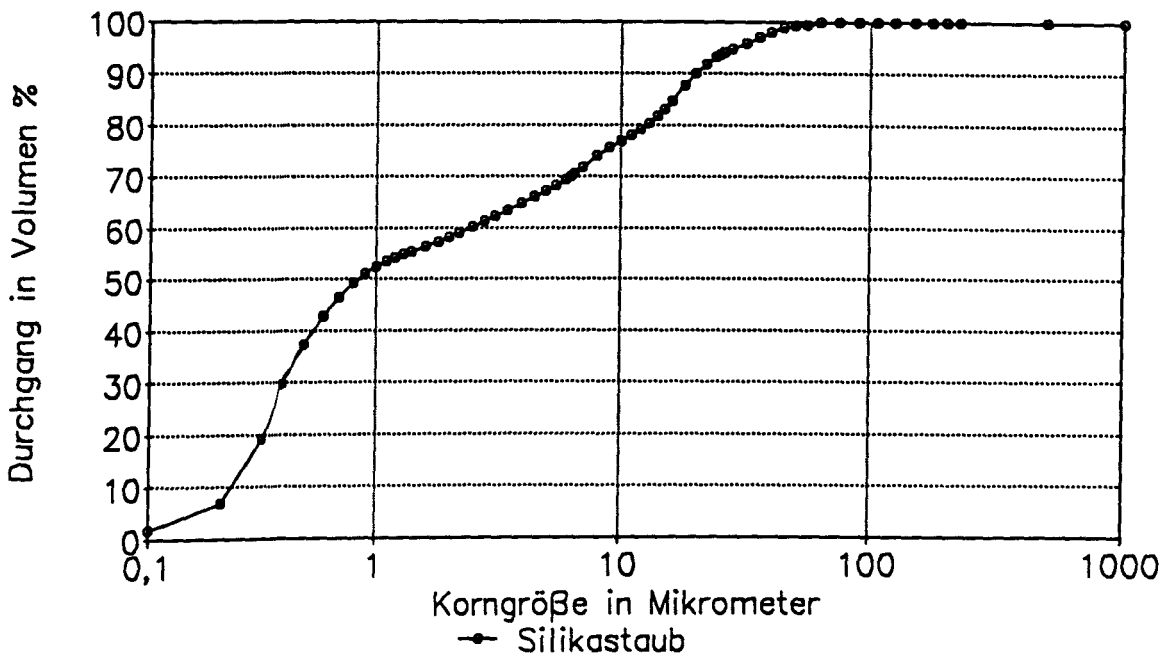


Abbildung 2: Oben: Korngrößenverteilung der Flugasche KM/C nach eigenen Untersuchungen. Unten: Korngrößenverteilung der Silikastaubsuspension MS-S 500 S nach eigenen Untersuchungen.

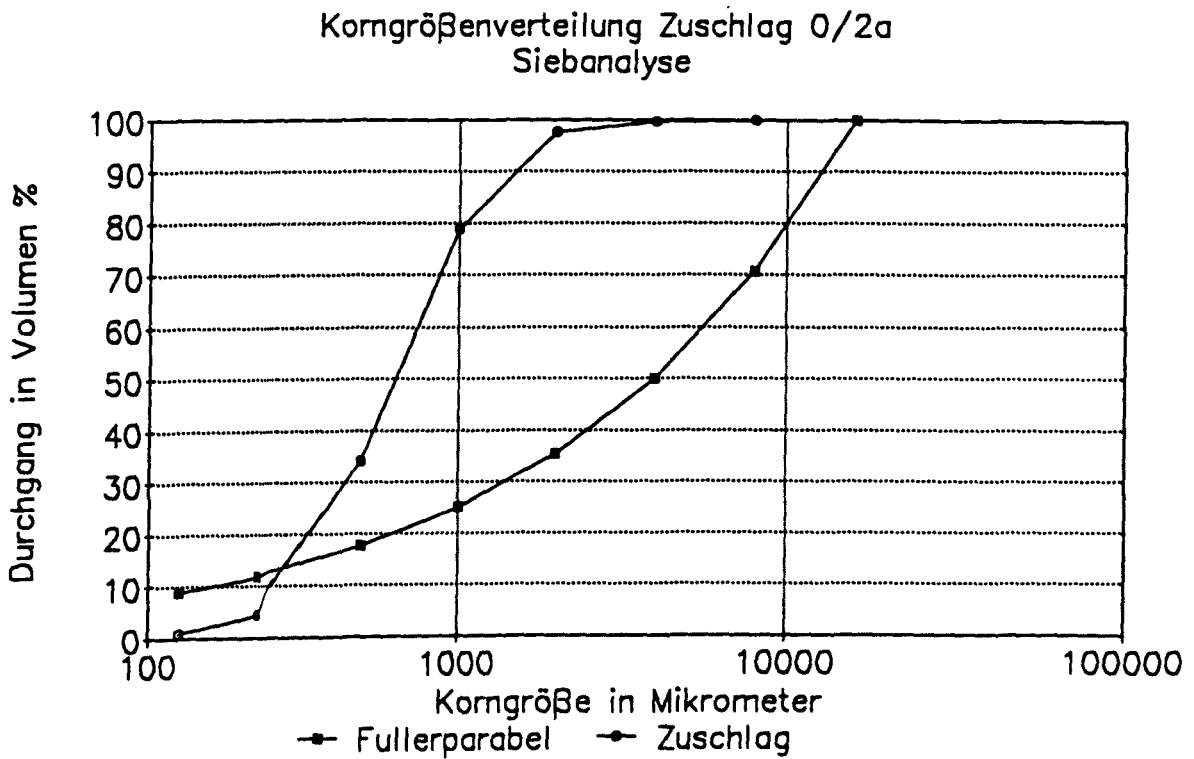
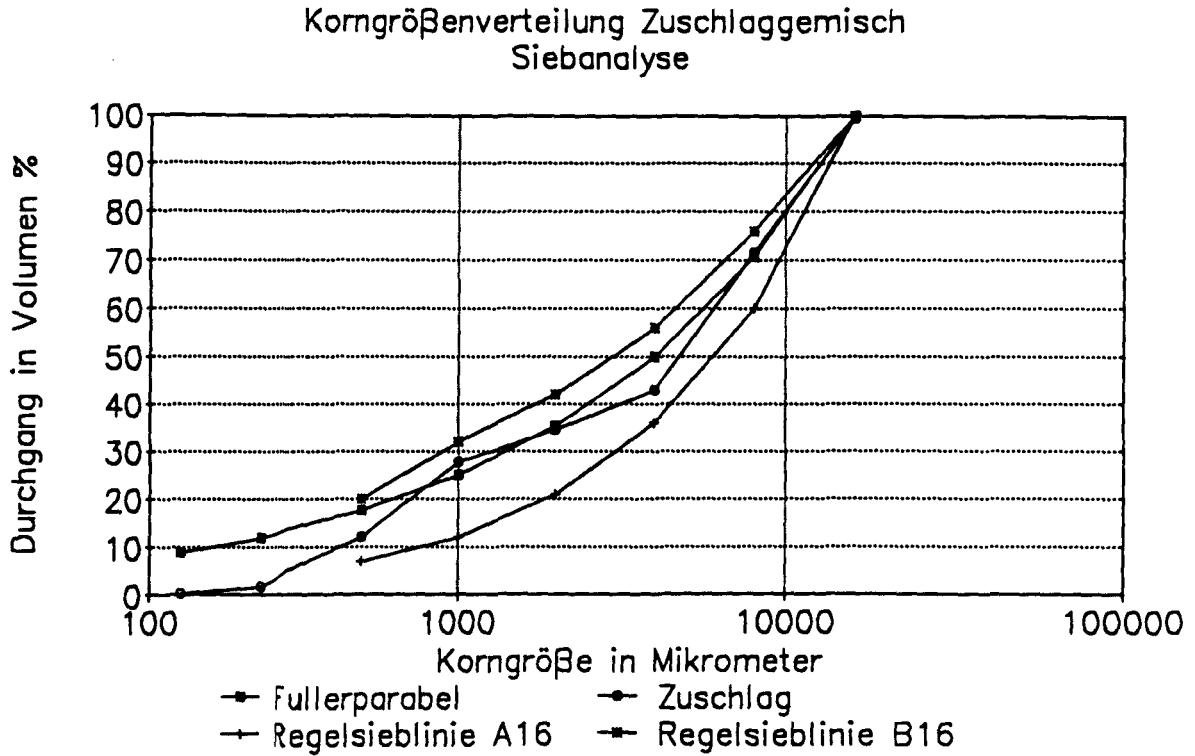
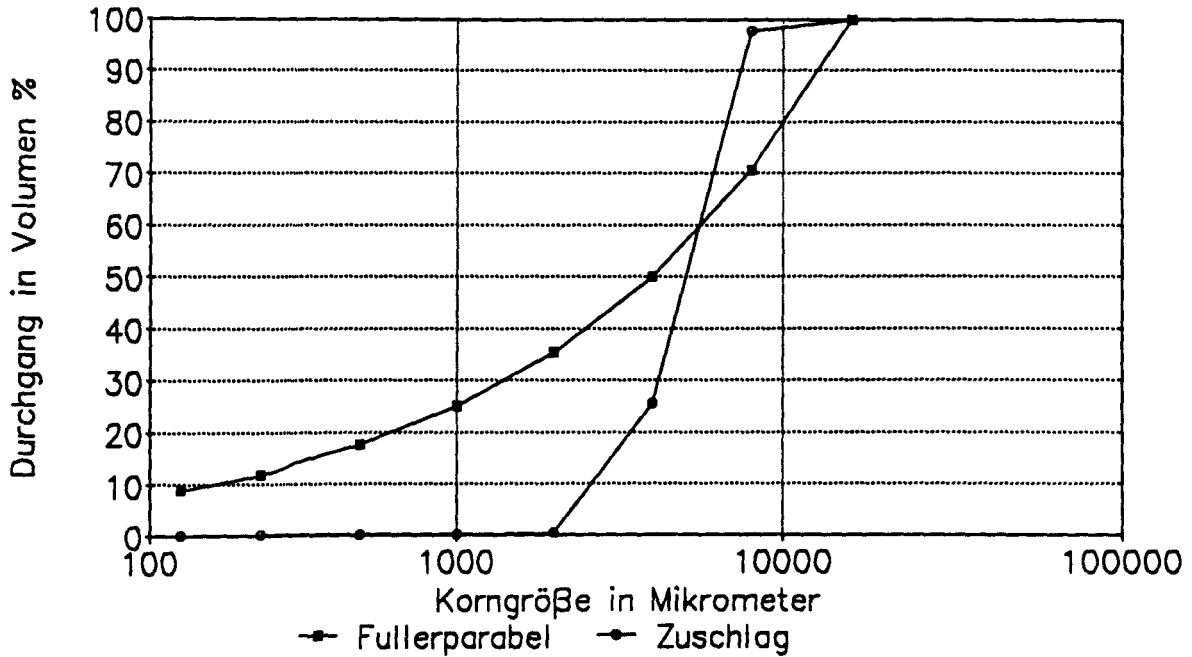


Abbildung 3: Oben: Korngrößenverteilung des verwendeten Zuschlaggemisches A/B16. Unten: Korngrößenverteilung des verwendeten Zuschlages 0/2a.

### Korngrößenverteilung Zuschlag 2/8 Siebanalyse



### Korngrößenverteilung Zuschlag 8/16 Siebanalyse

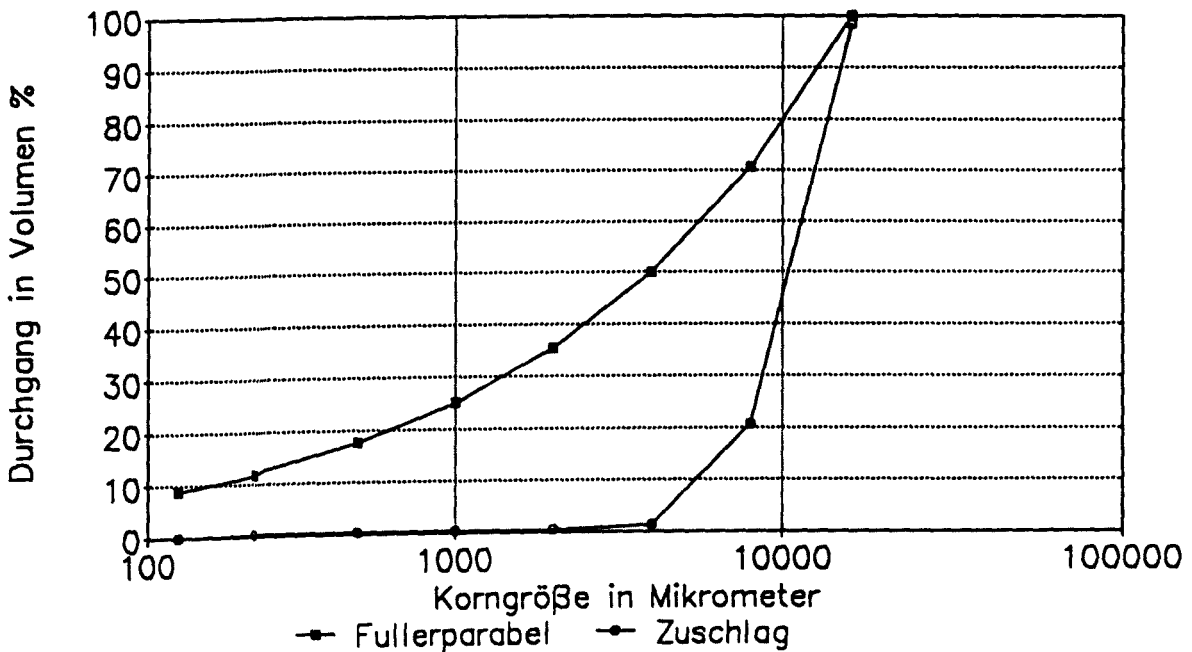
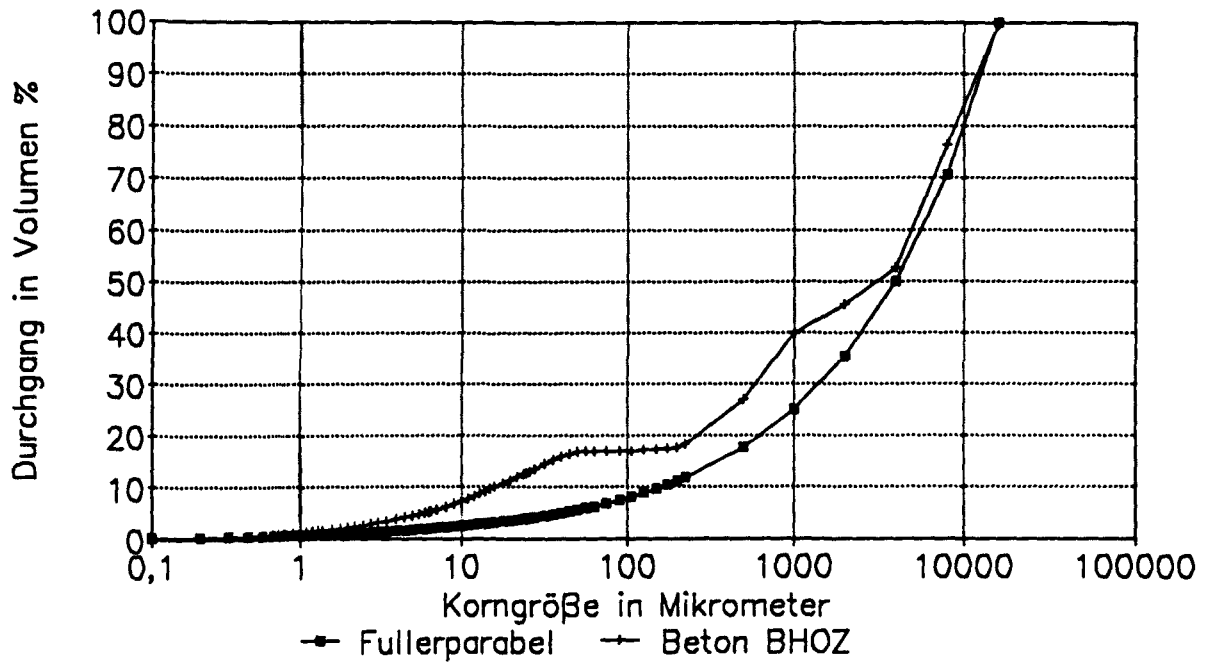


Abbildung 4: Oben: Korngrößenverteilung des verwendeten Zuschlages 2/8. Unten: Korngrößenverteilung des verwendeten Zuschlages 8/16.

Korngrößenverteilung BHOZ  
Laser-Granulometer/Siebanalyse



Korngrößenverteilung BHOZ  
Laser-Granulometer/Siebanalyse

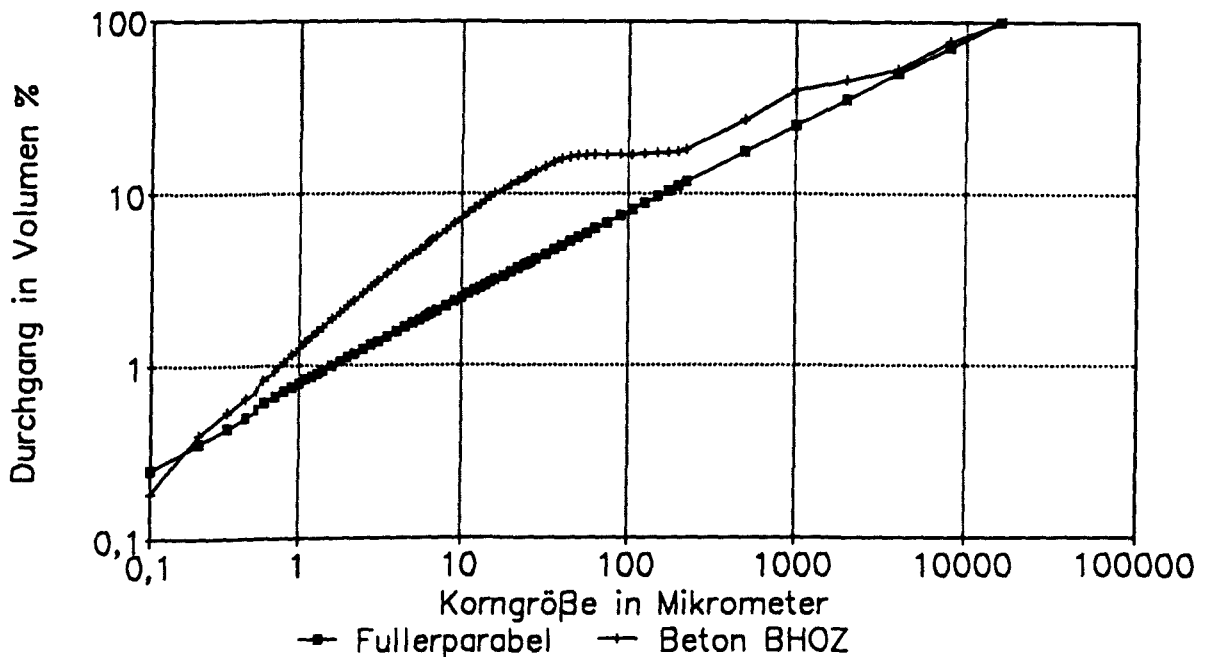


Abbildung 5: Korngrößenverteilung des Betons BHOZ. Oben: Halblogarithmische Darstellung. Unten: Doppeltlogarithmische Darstellung.

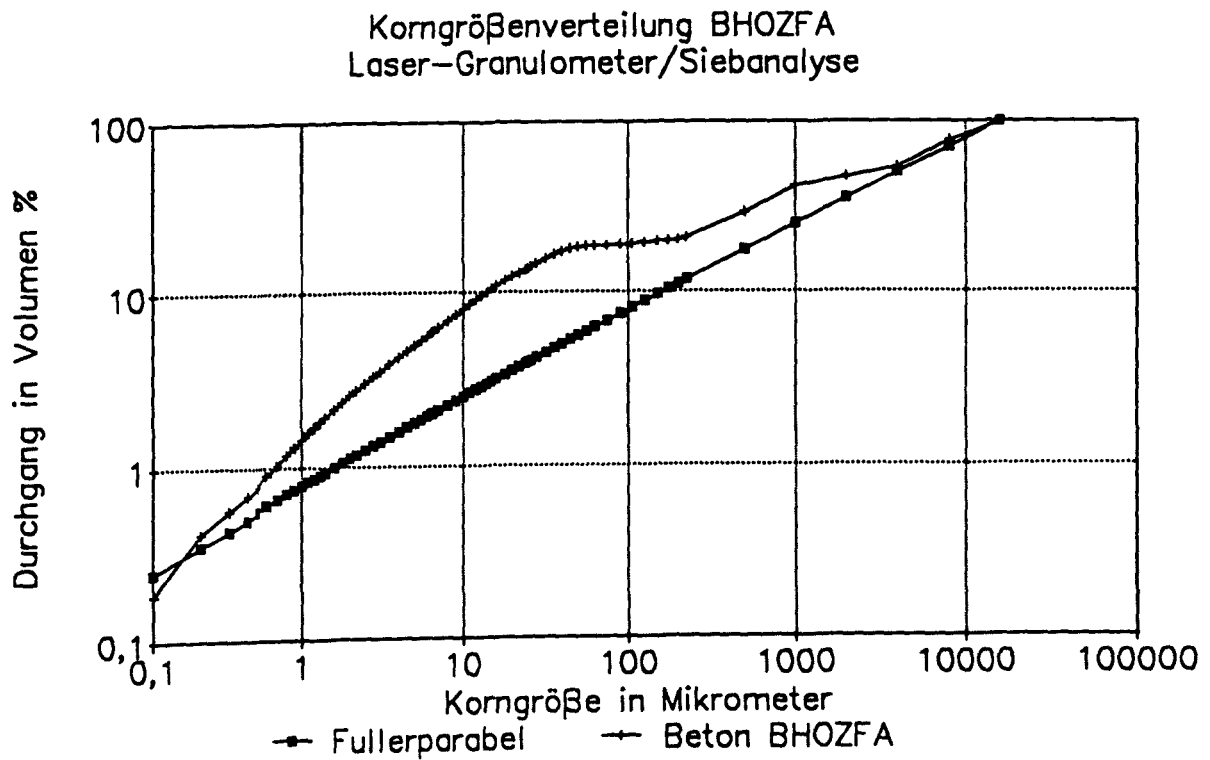
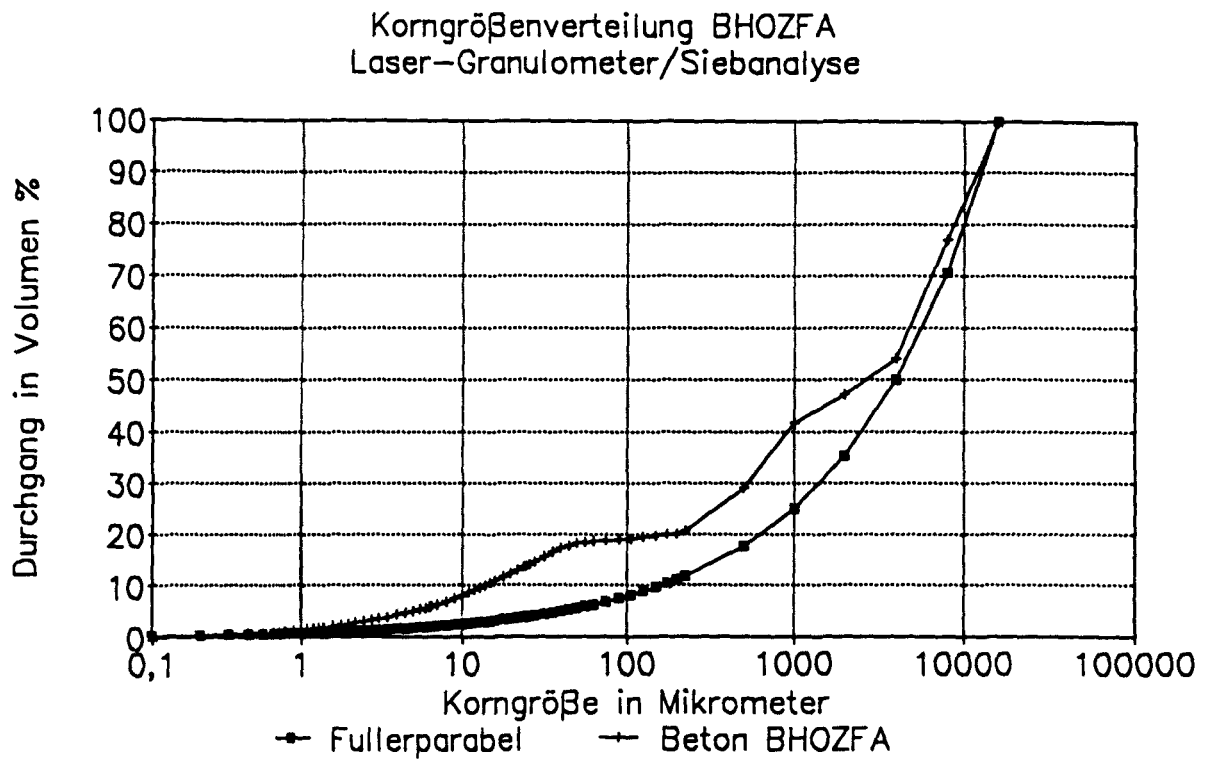
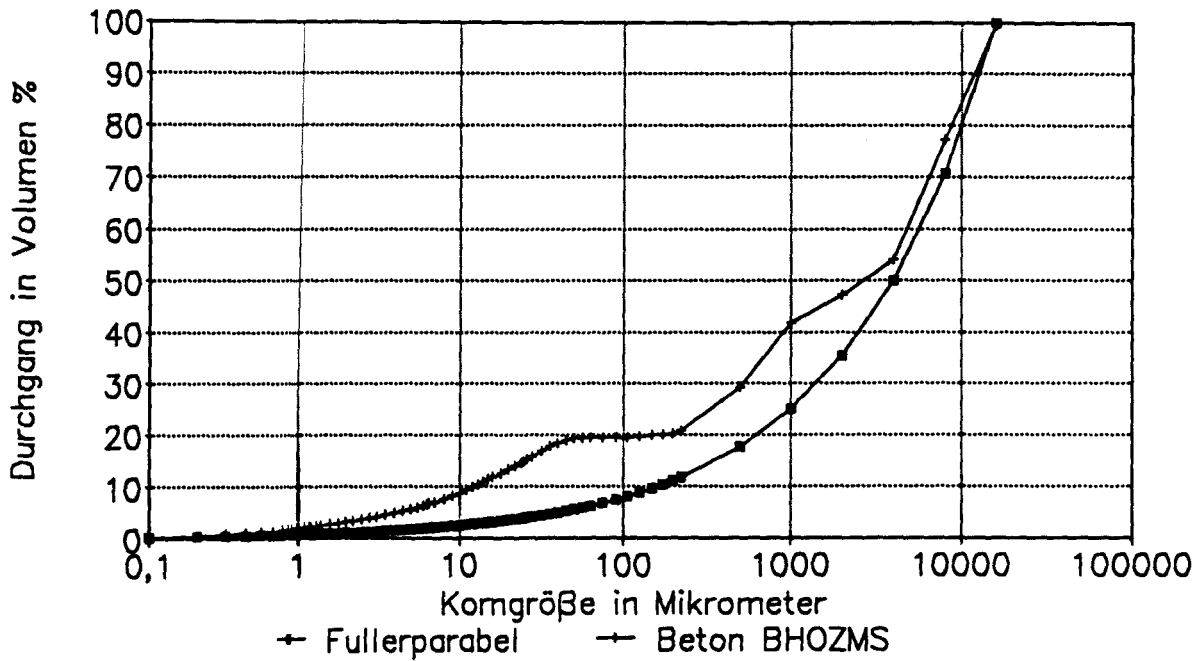


Abbildung 6: Korngrößenverteilung des Betons BHOZFA. Oben: Halblogarithmische Darstellung. Unten: Doppeltlogarithmische Darstellung.

Korngrößenverteilung BHOZMS  
Laser-Granulometer/Siebanalyse



Korngrößenverteilung BHOZMS  
Laser-Granulometer/Siebanalyse

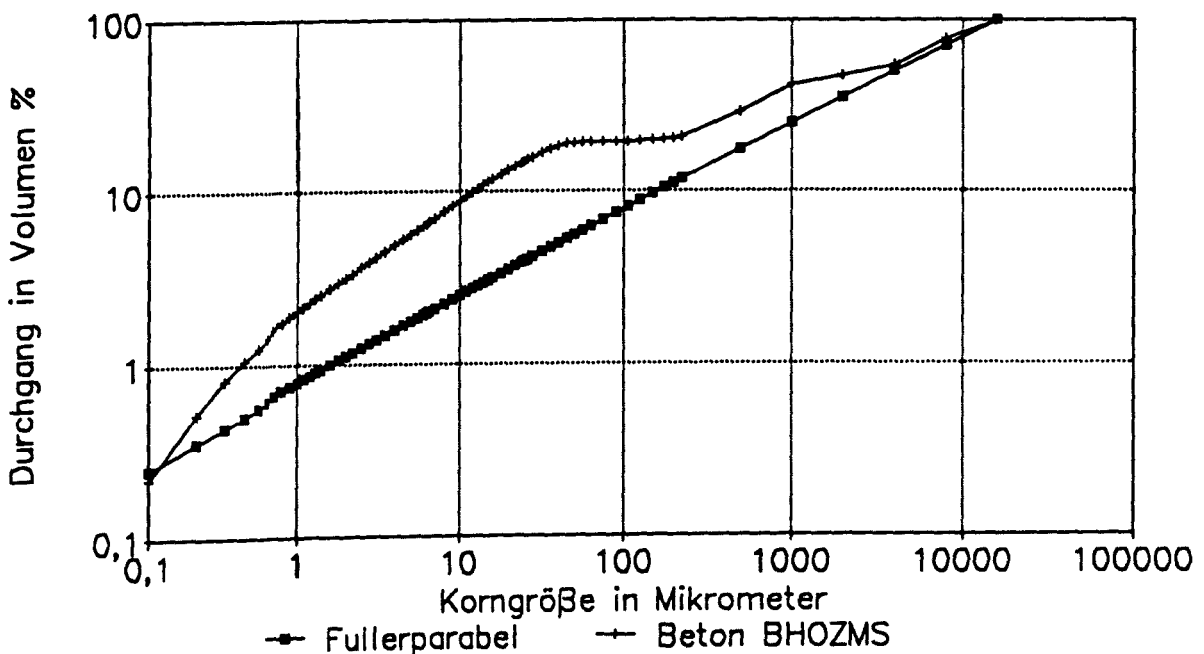


Abbildung 7: Korngrößenverteilung des Betons BHOZMS. Oben: Halblogarithmische Darstellung. Unten: Doppeltlogarithmische Darstellung.

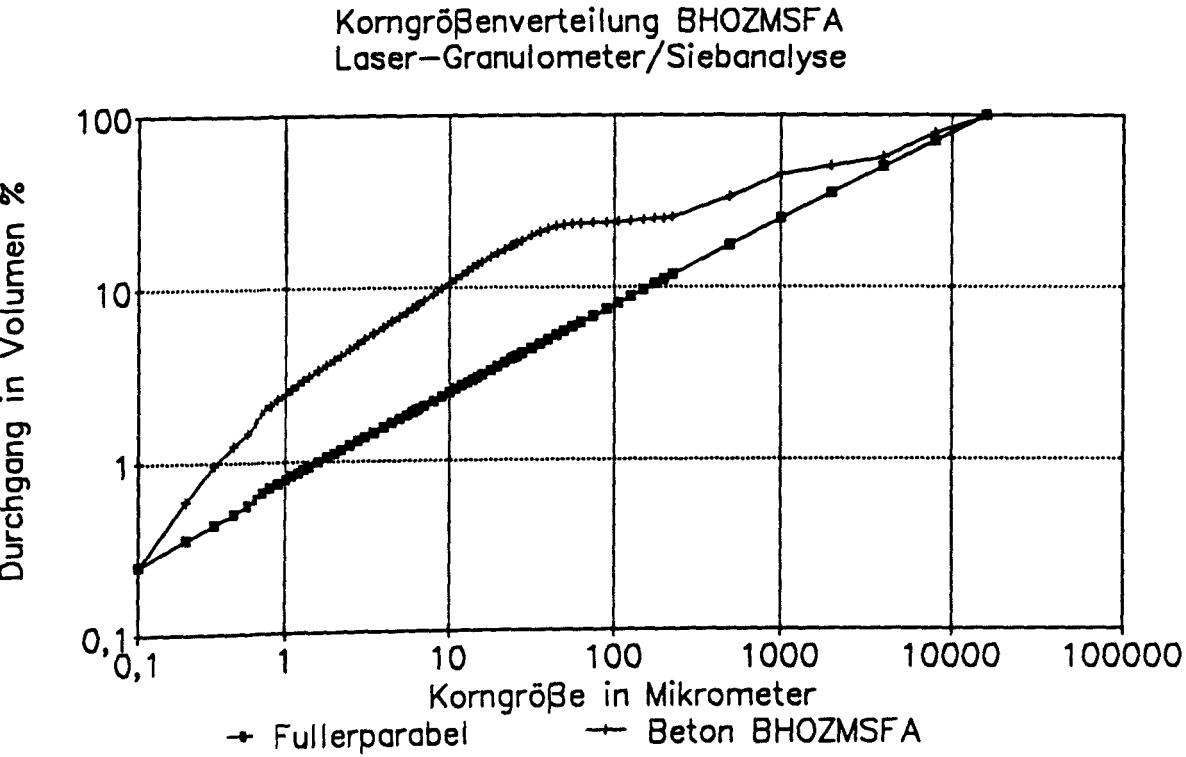
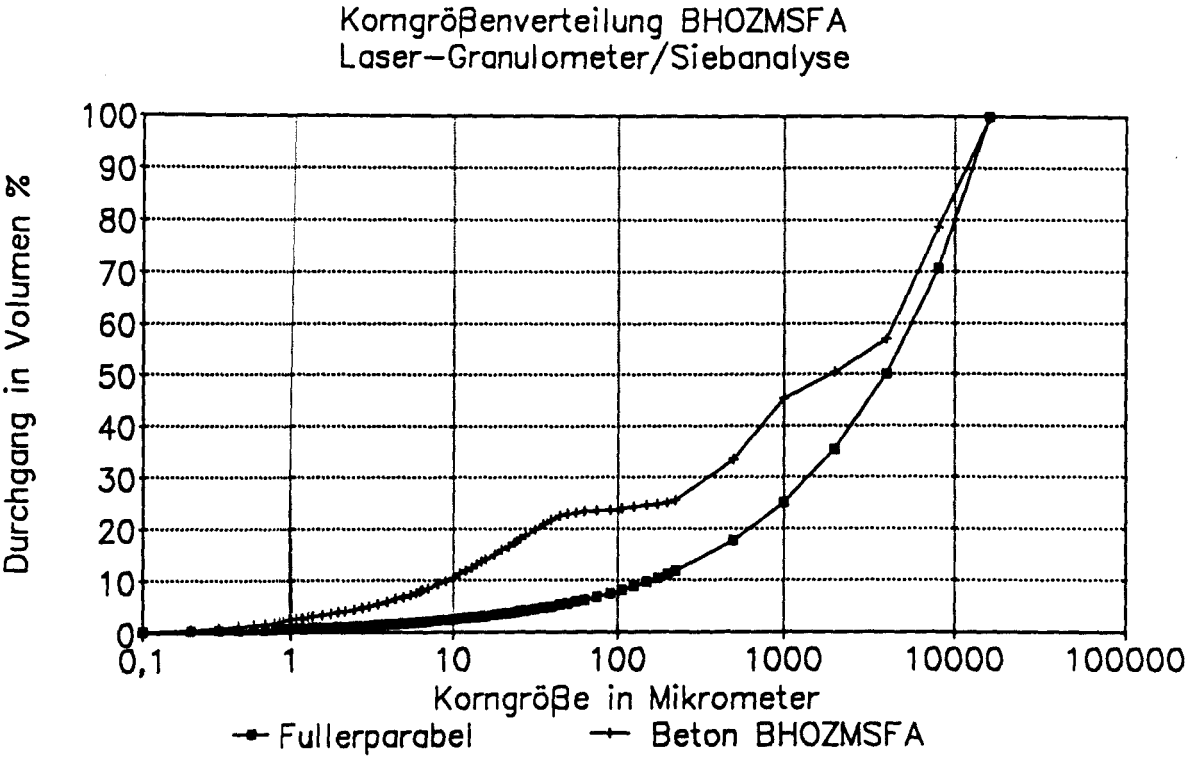
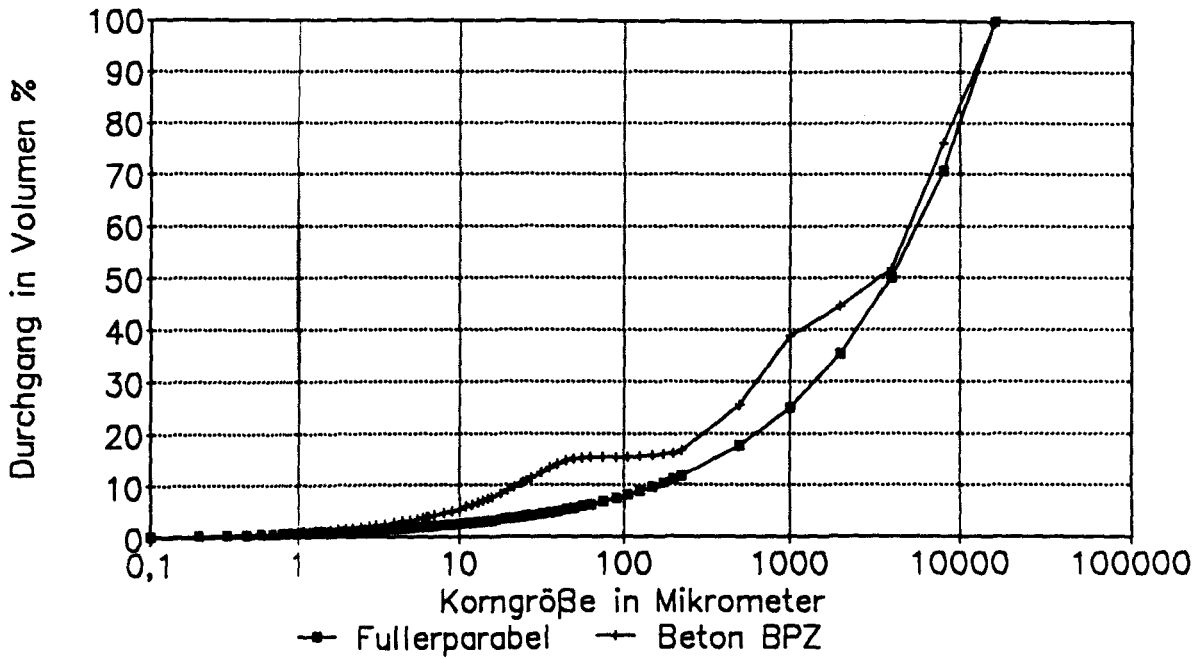


Abbildung 8: Korngrößenverteilung des Betons BHOZMSFA. Oben: Halblogarithmische Darstellung. Unten: Doppeltlogarithmische Darstellung.



Korngrößenverteilung BPZ  
Laser-Granulometer/Siebanalyse



Korngrößenverteilung BPZ  
Laser-Granulometer/Siebanalyse

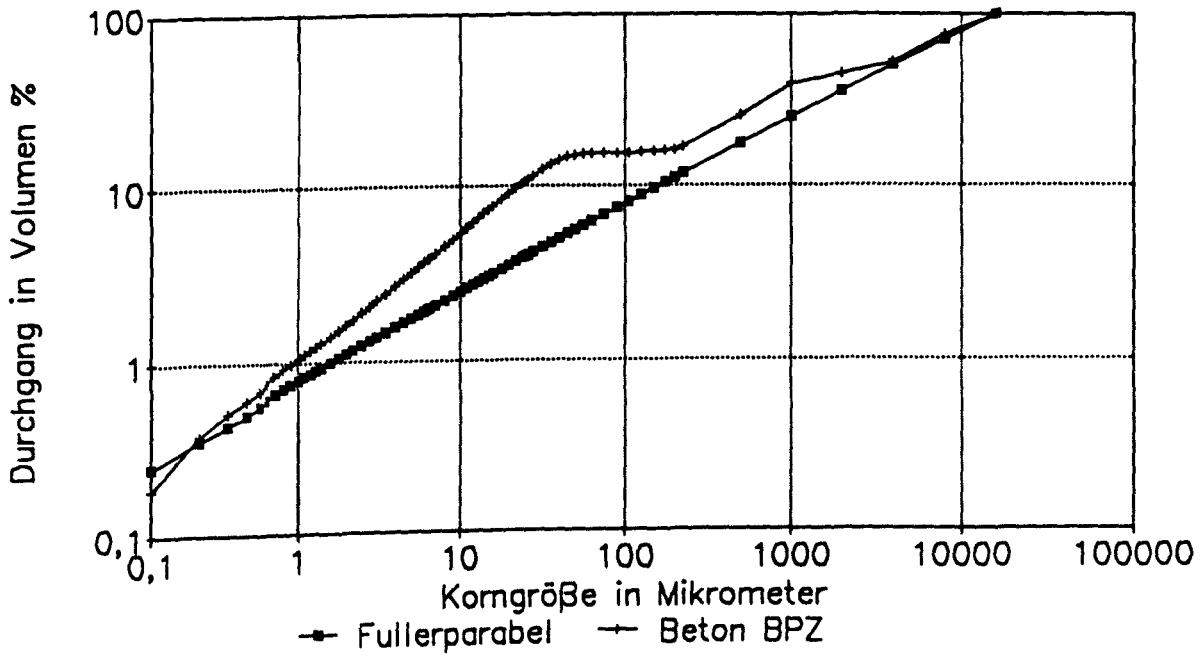
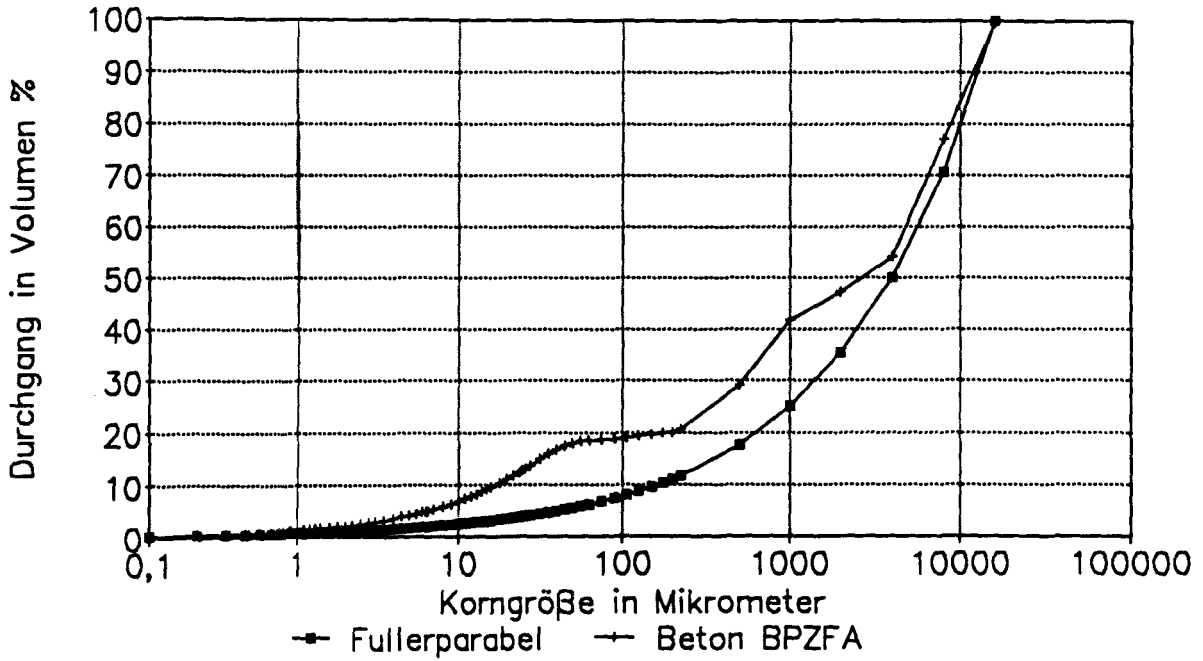


Abbildung 9: Korngrößenverteilung des Betons BPZ. Oben: Halblogarithmische Darstellung. Unten: Doppeltlogarithmische Darstellung.

Korngrößenverteilung BPZFA  
Laser-Granulometer/Siebanalyse



Korngrößenverteilung BPZFA  
Laser-Granulometer/Siebanalyse

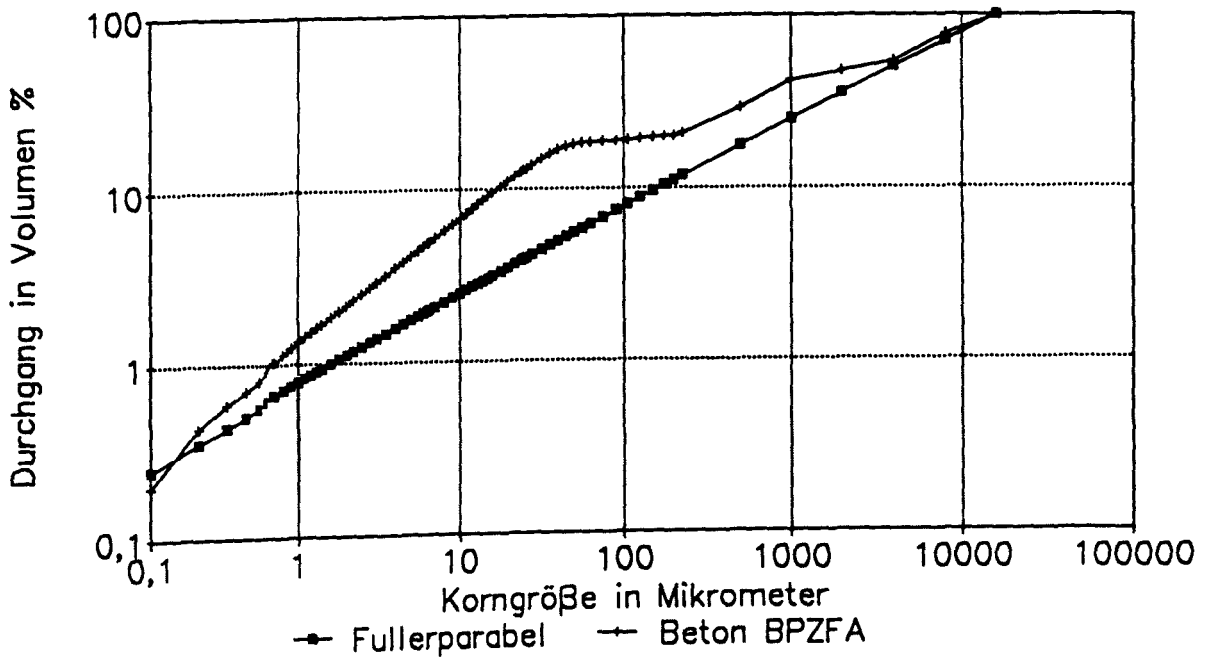
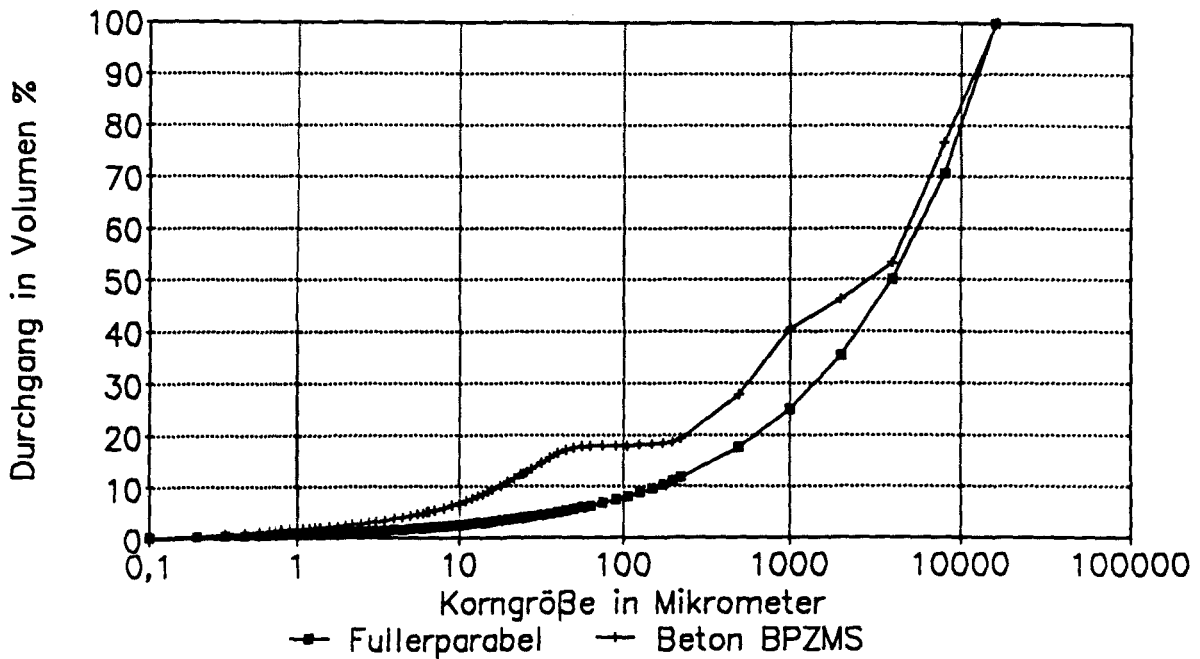


Abbildung 10: Korngrößenverteilung des Betons BPZFA. Oben: Halblogarithmische Darstellung. Unten: Doppeltlogarithmische Darstellung.

Korngrößenverteilung BPZMS  
Laser-Granulometer/Siebanalyse



Korngrößenverteilung BPZMS  
Laser-Granulometer/Siebanalyse

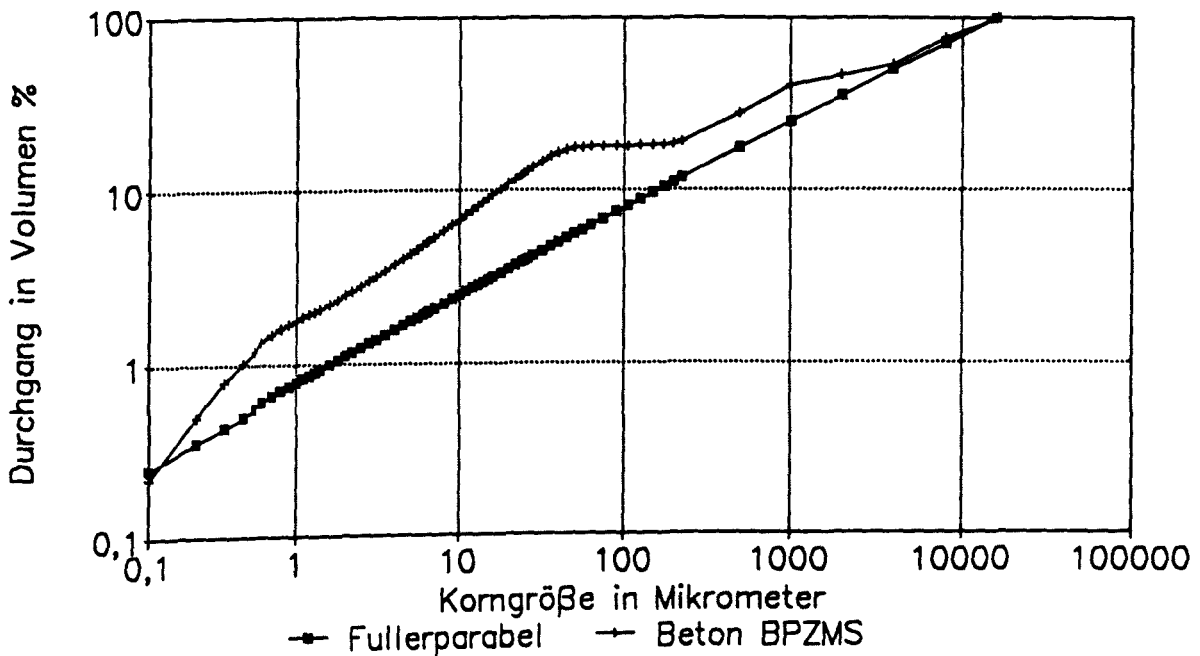
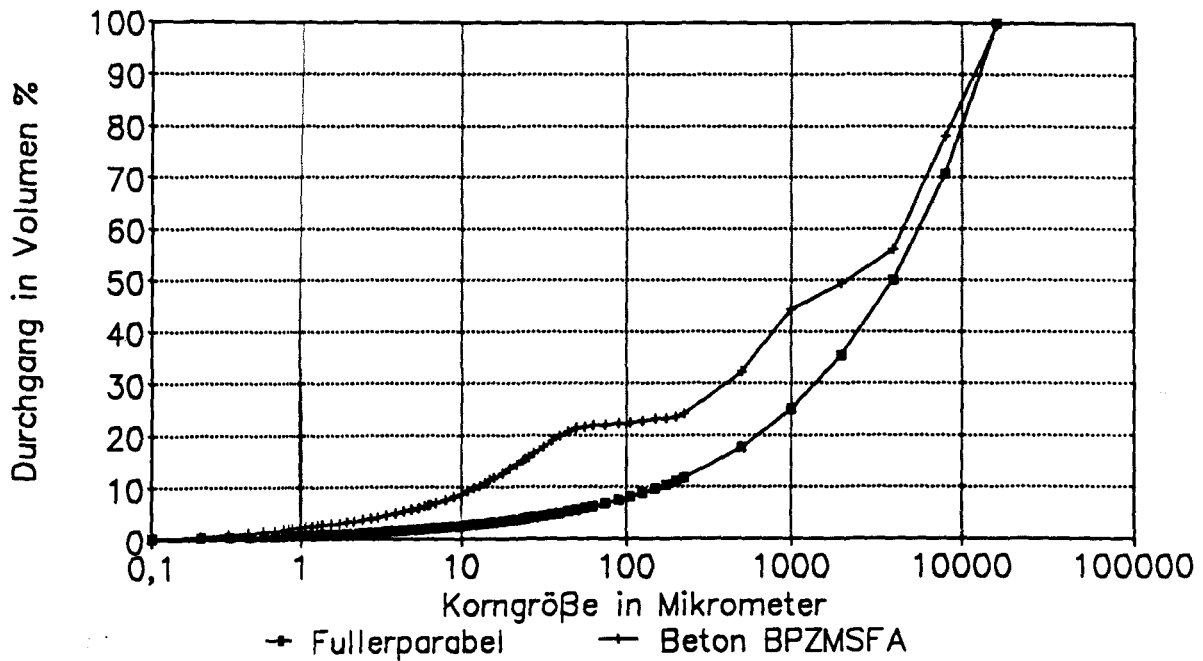


Abbildung 11: Korngrößenverteilung des Betons BPZMS. Oben: Halblogarithmische Darstellung. Unten: Doppeltlogarithmische Darstellung.

Korngrößenverteilung BPZMSFA  
Laser-Granulometer/Siebanalyse



Korngrößenverteilung BPZMSFA  
Laser-Granulometer/Siebanalyse

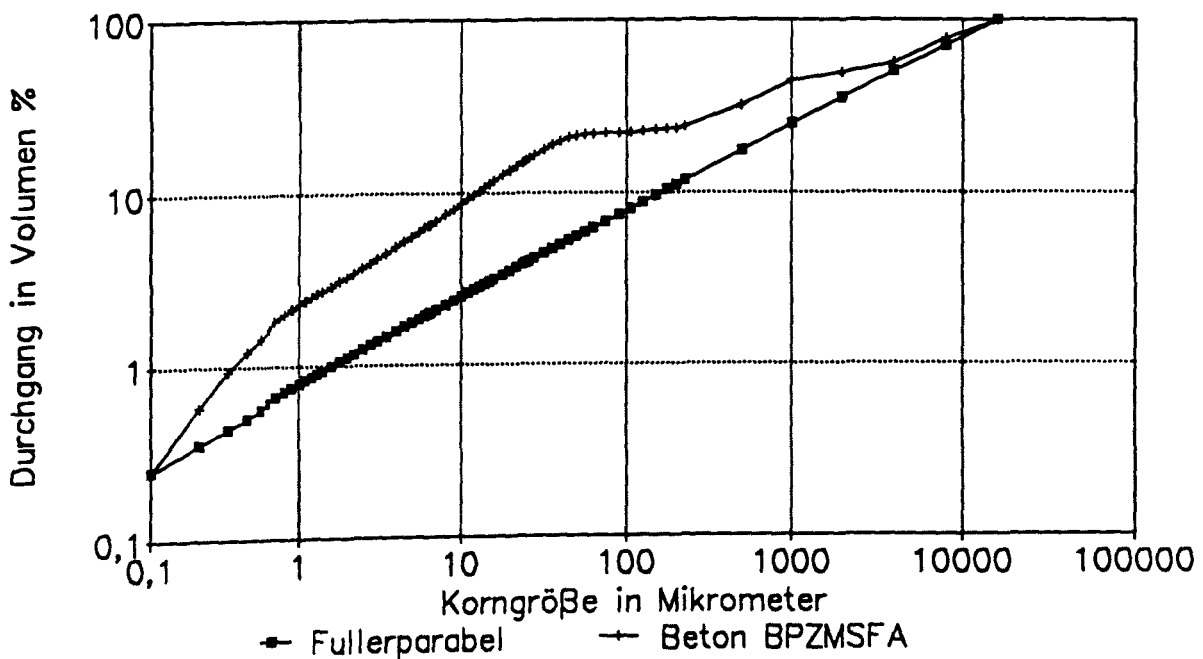


Abbildung 12: Korngrößenverteilung des Betons BPZMSFA. Oben: Halblogarithmische Darstellung. Unten: Doppeltlogarithmische Darstellung.

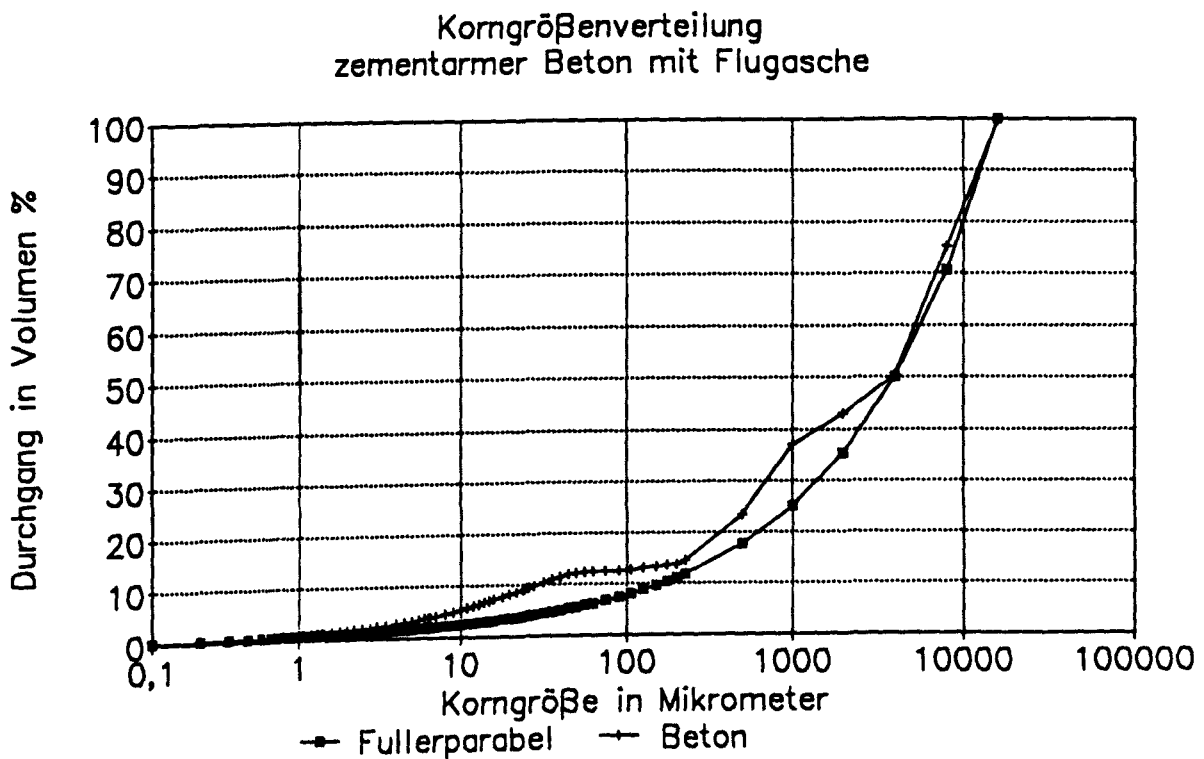
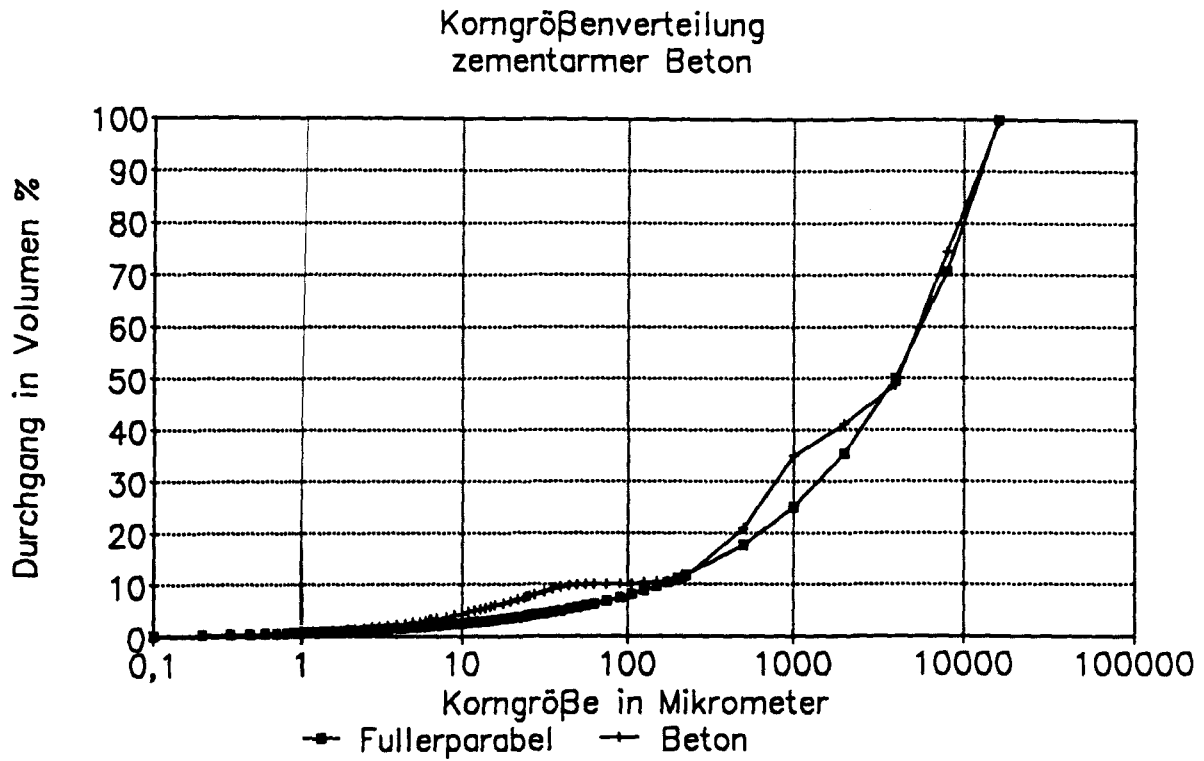


Abbildung 13: Oben: Korngrößenverteilung eines zementarmen Betons. Unten: Korngrößenverteilung eines entsprechenden Betons mit Flugaschezusatz.

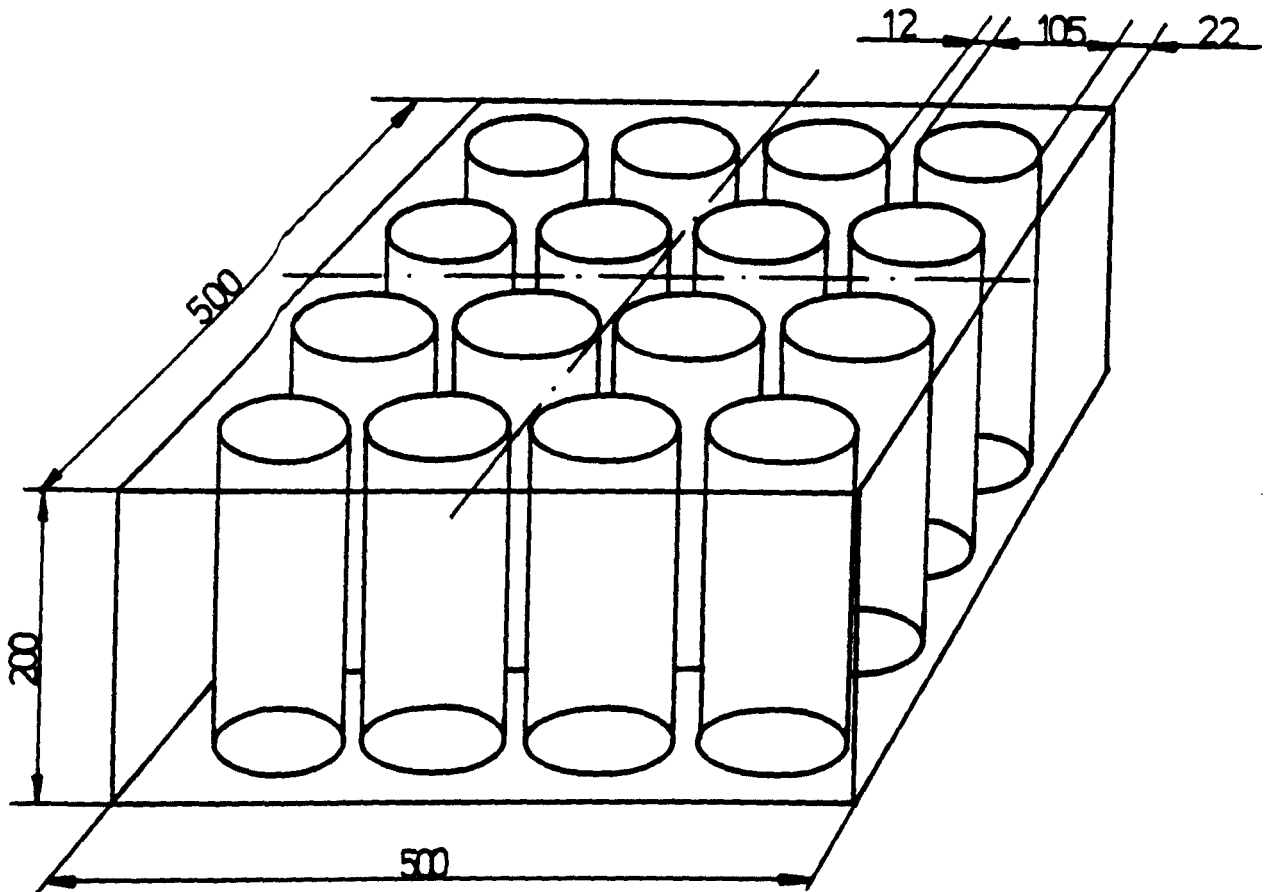


Abbildung 14: Lage der ausgebohrten Zylinder in den betonierten Platten. Die äußeren Zylinder tragen die Nummern 1-12, die inneren die Nummern 13-16.

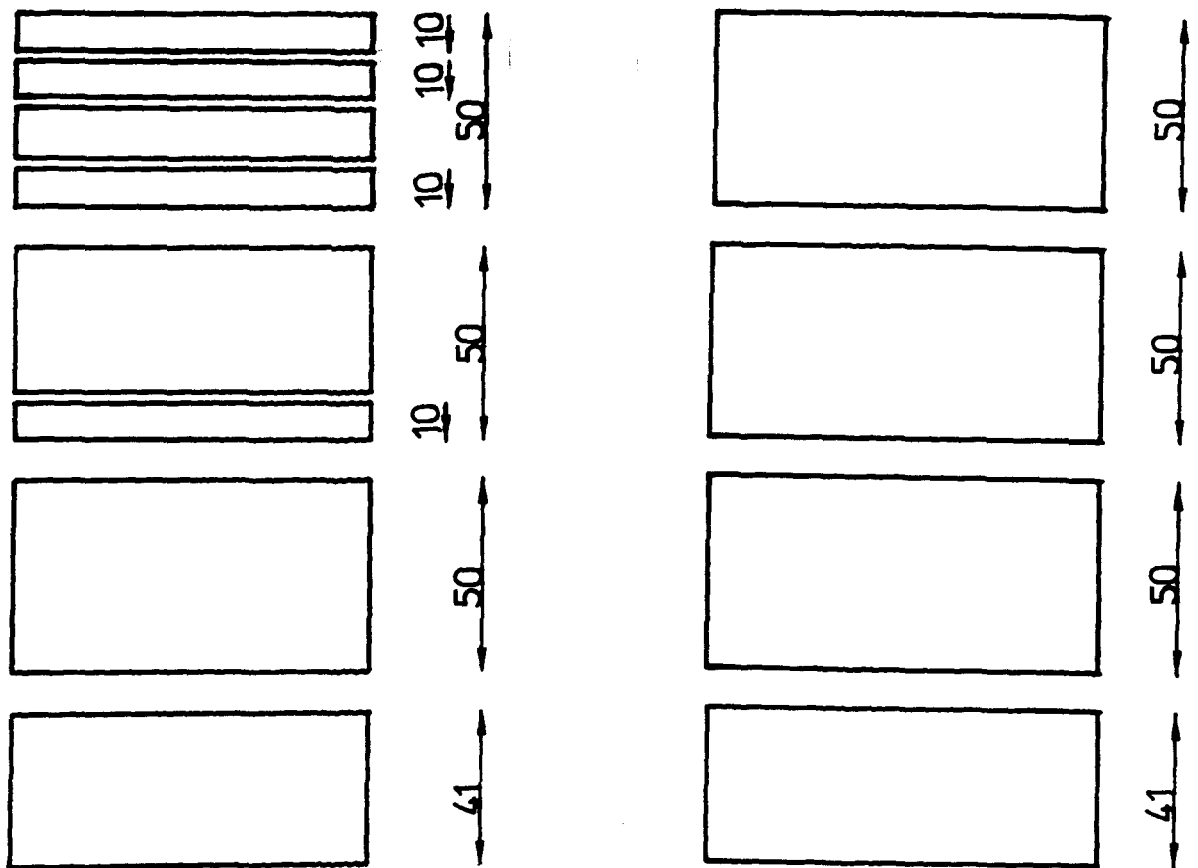
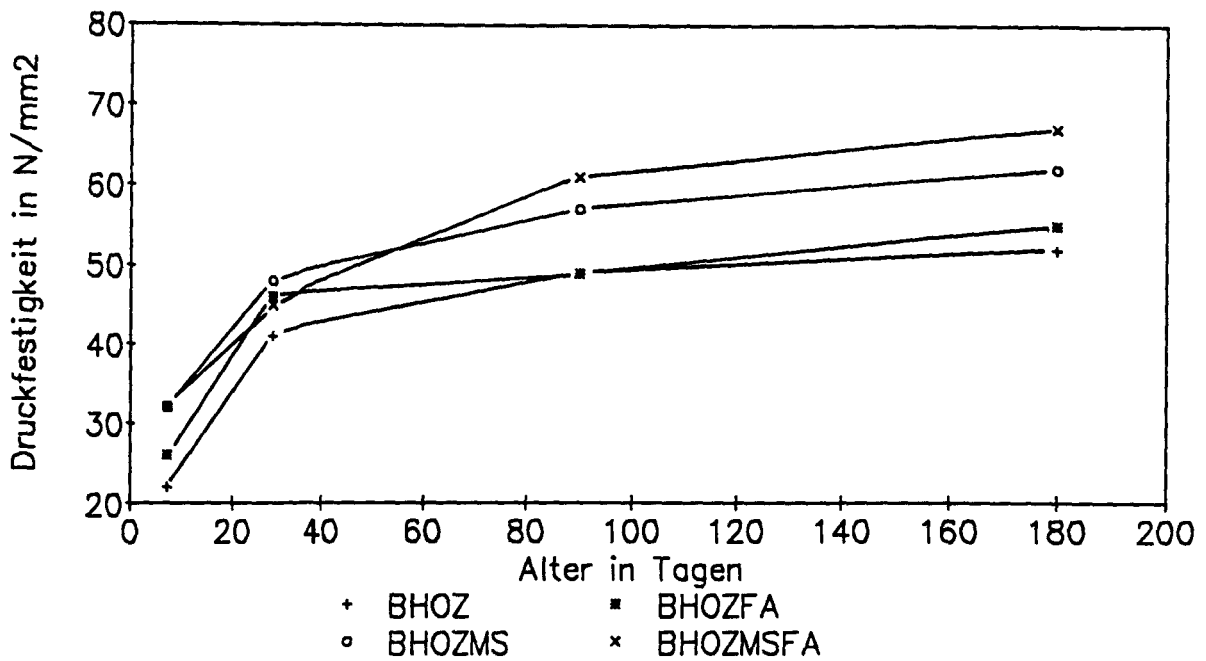


Abbildung 15: Lage der einzelnen Betonscheiben in den ausgebohrten Zylindern.  
 Rechts: Zylinder 1-15. Links: Zylinder 16.

### Würfeldruckfestigkeit der Betone mit Hochofenzement



### Würfeldruckfestigkeit der Betone mit Portlandzement

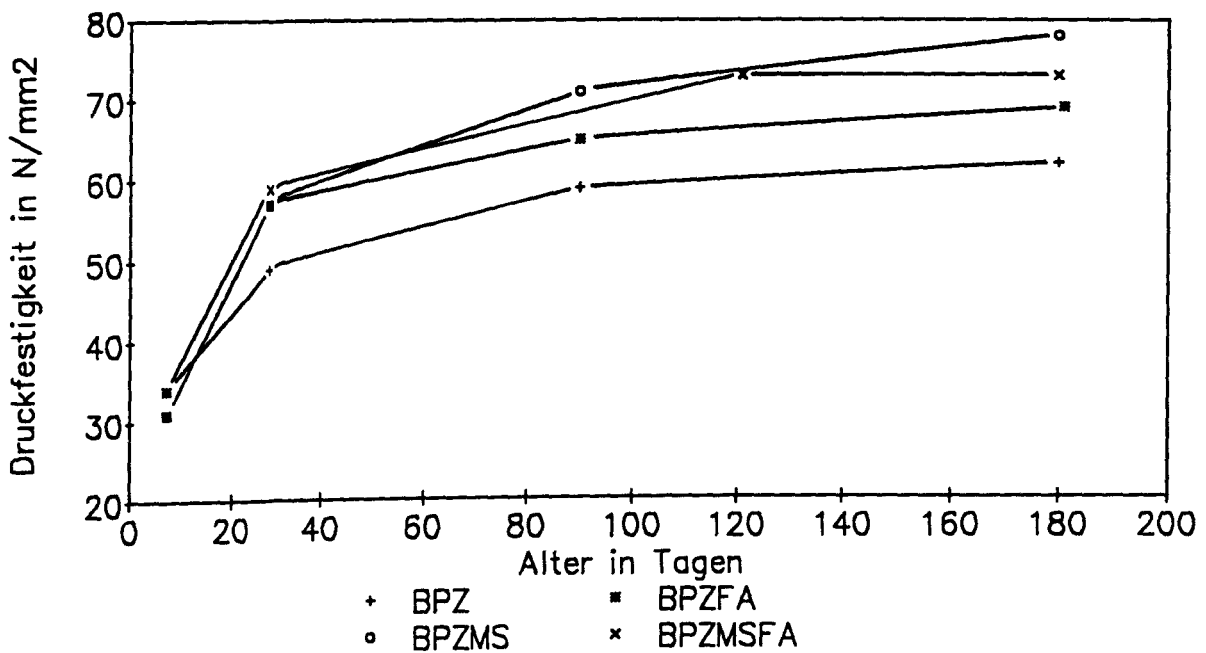


Abbildung 16: Oben: Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit der Betone mit Hochofenzement als Funktion der Zeit. Unten: Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit der Betone mit Portlandzement als Funktion der Zeit.



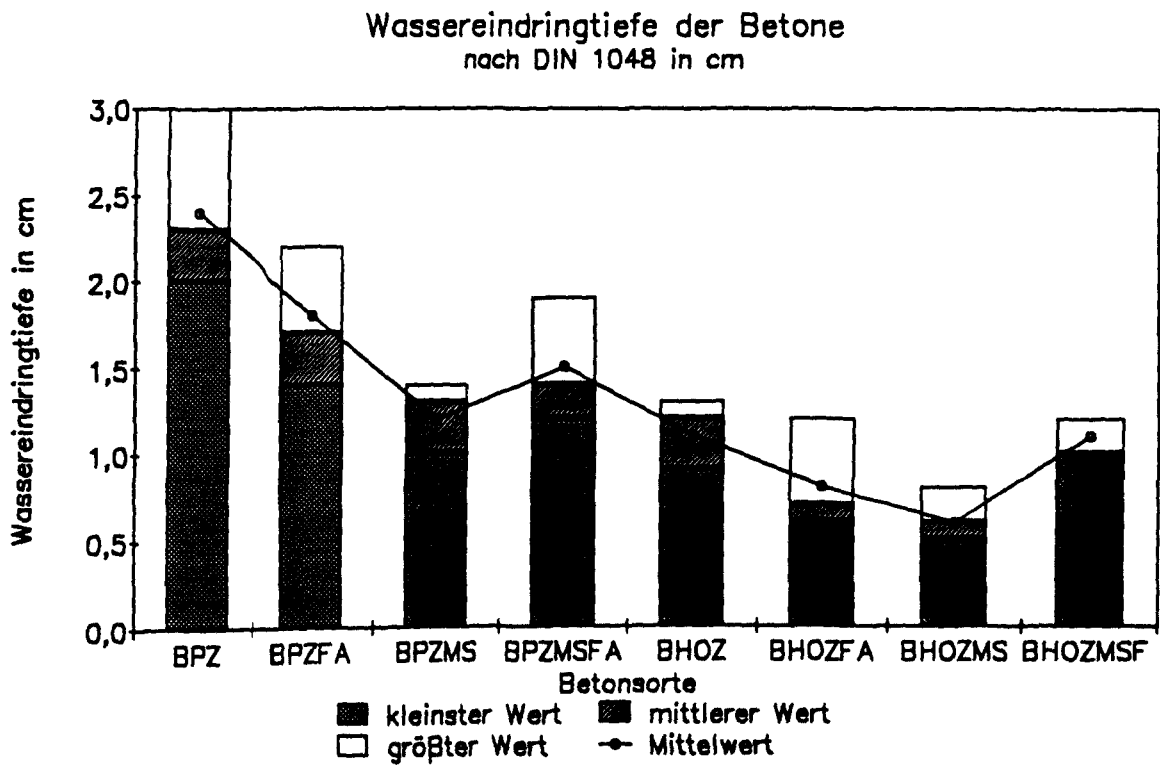


Abbildung 17: Wassereindringtiefe der Versuchsbetone nach DIN 1048 in cm.

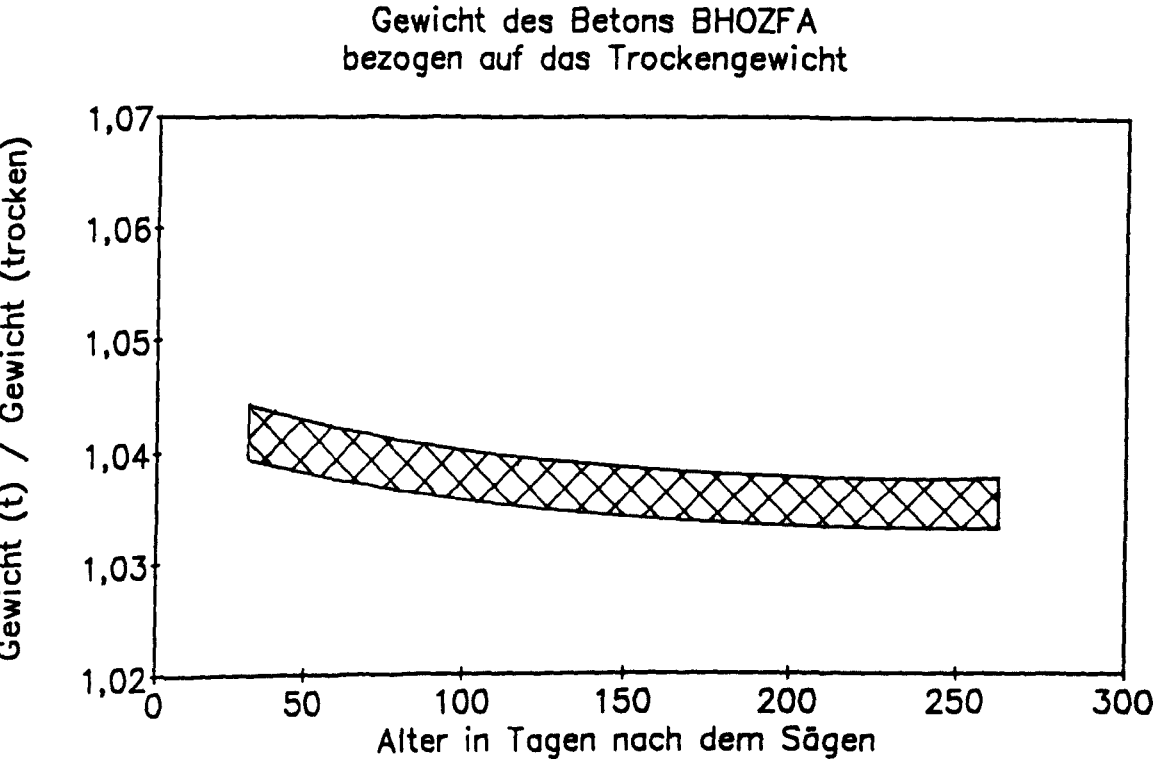
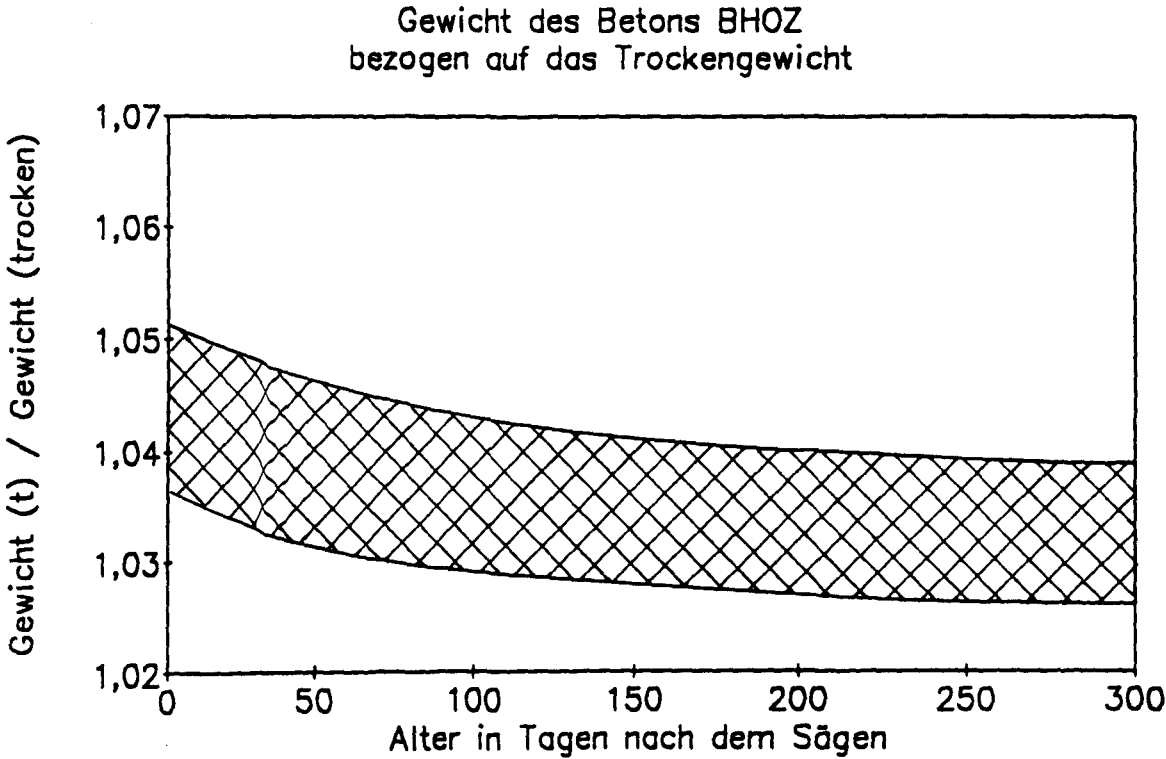


Abbildung 18: Oben: Entwässerung des Betons BHOZ. Unten: Entwässerung des Betons BHOZFA.

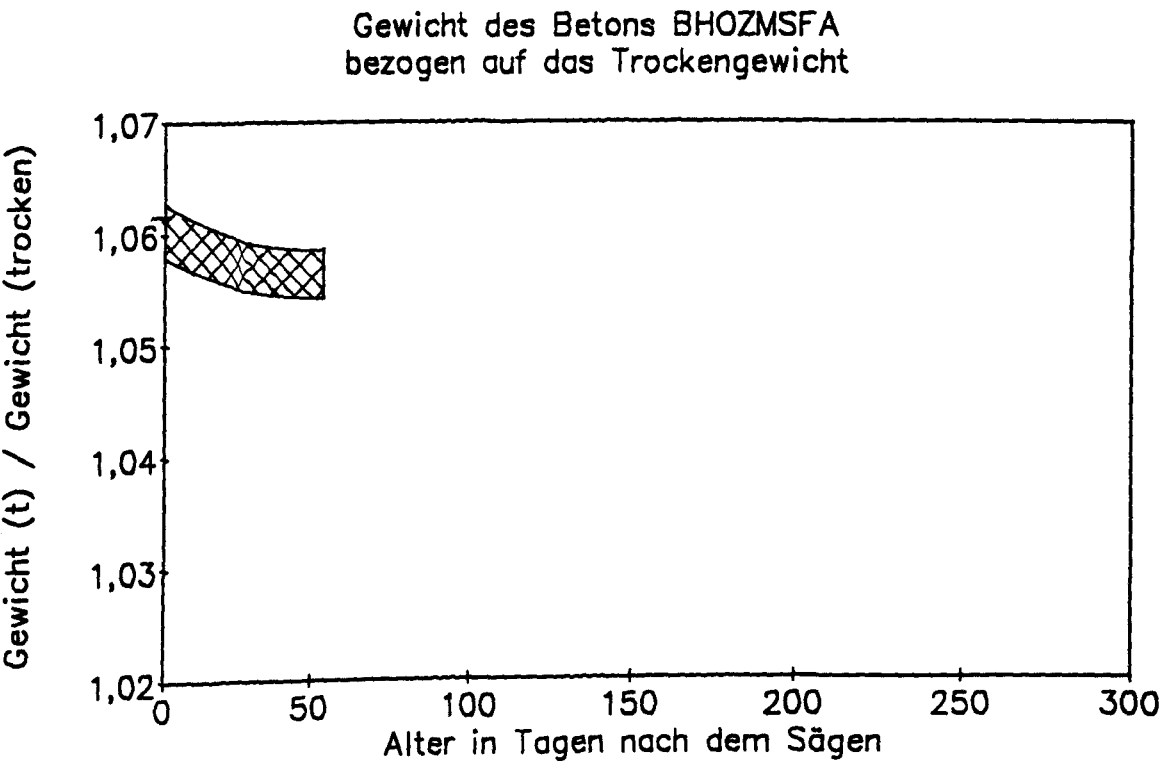
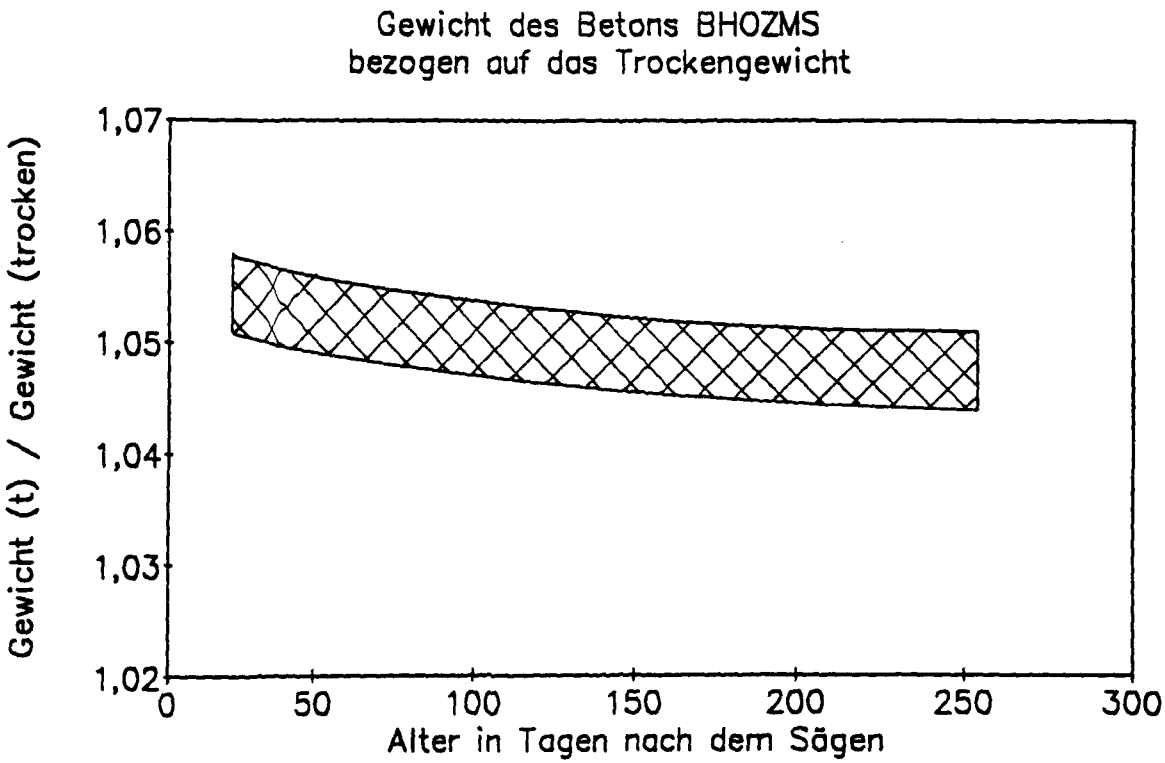
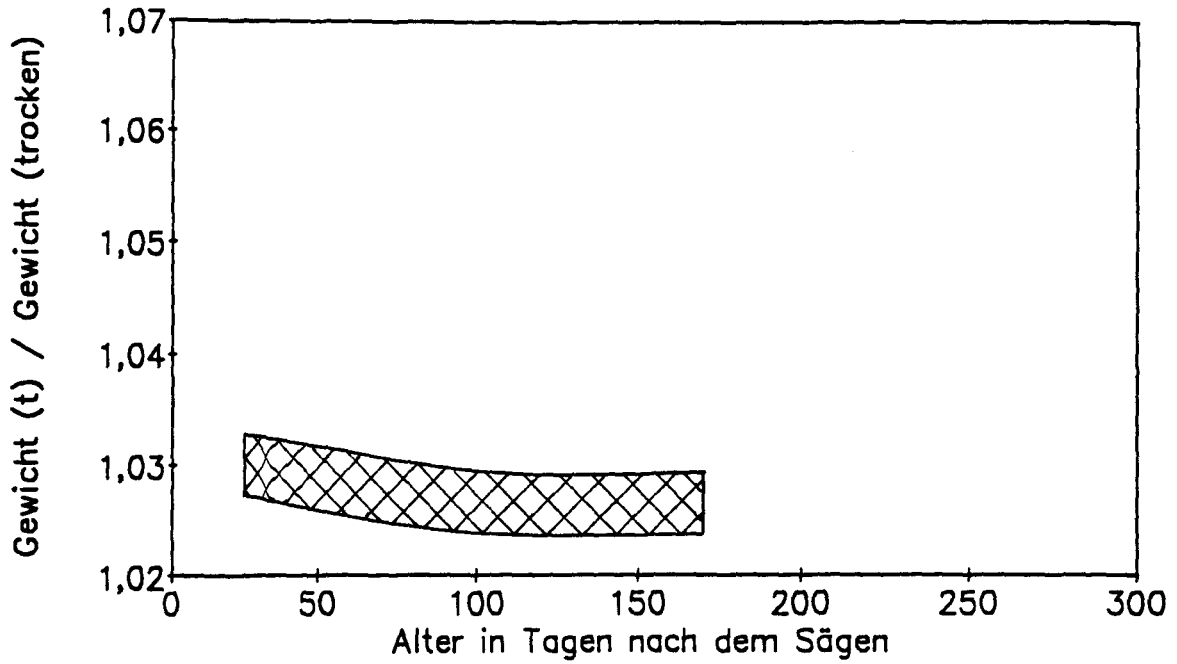


Abbildung 19: Oben: Entwässerung des Betons BHOZMS. Unten: Entwässerung des Betons BHOZMSFA.

Gewicht des Betons BPZ  
bezogen auf das Trockengewicht



Gewicht des Betons BPZFA  
bezogen auf das Trockengewicht

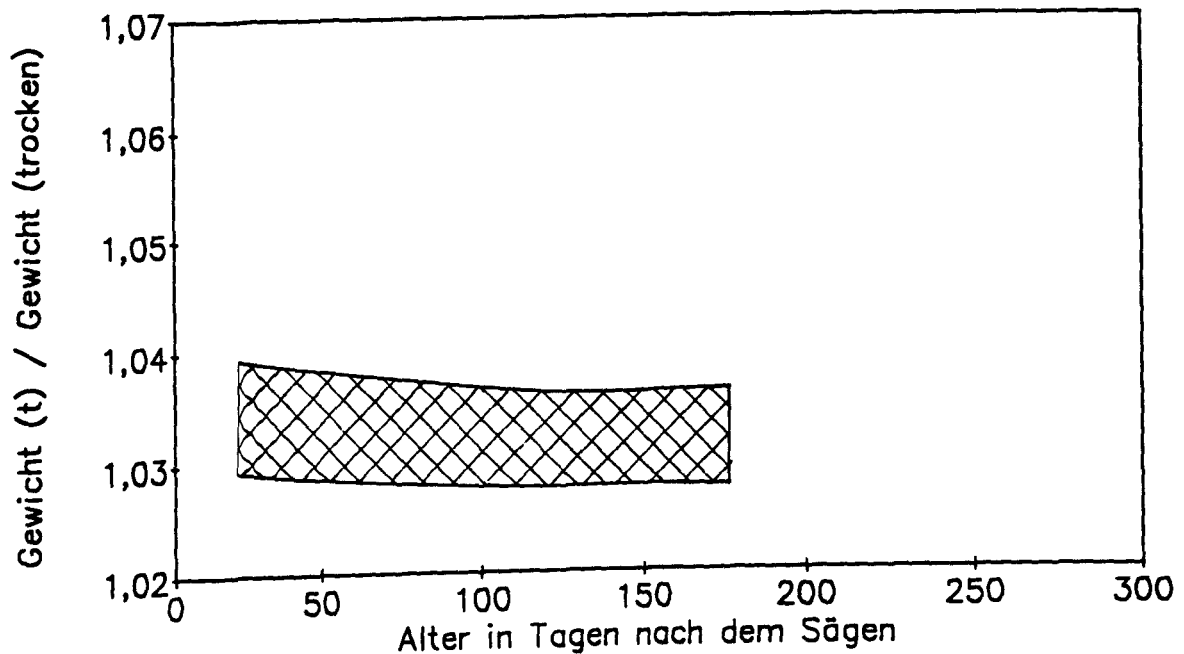
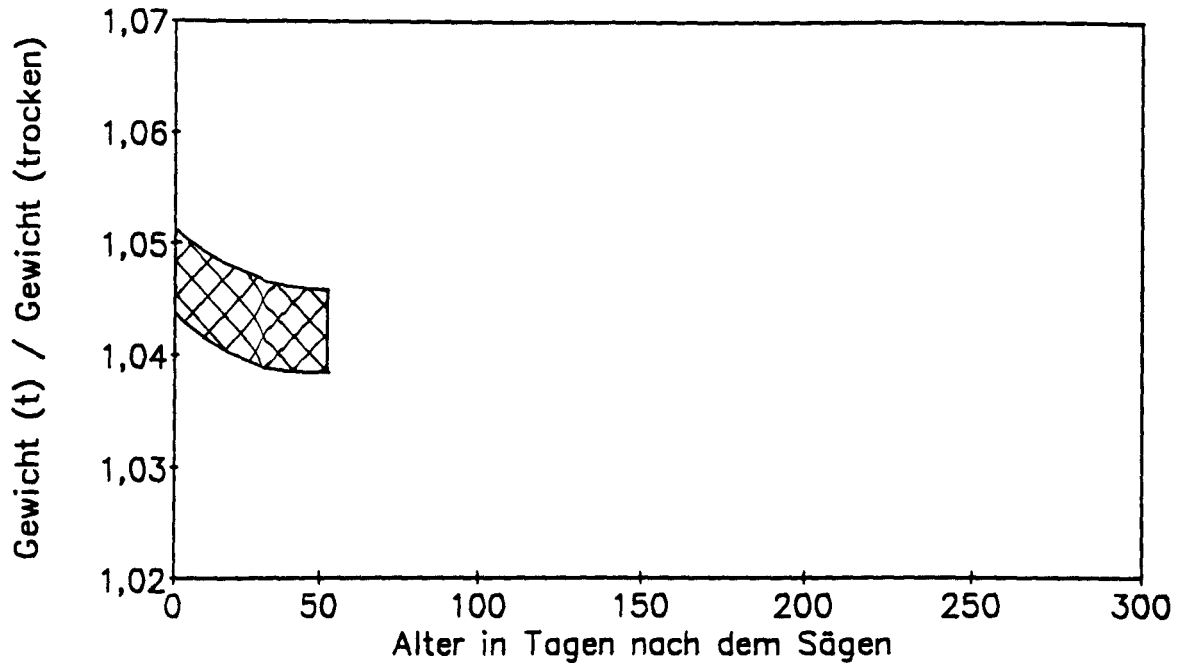


Abbildung 20: Oben: Entwässerung des Betons BPZ. Unten: Entwässerung des Betons BPZFA.

Gewicht des Betons BPZMS  
bezogen auf das Trockengewicht



Gewicht des Betons BPZMSFA  
bezogen auf das Trockengewicht

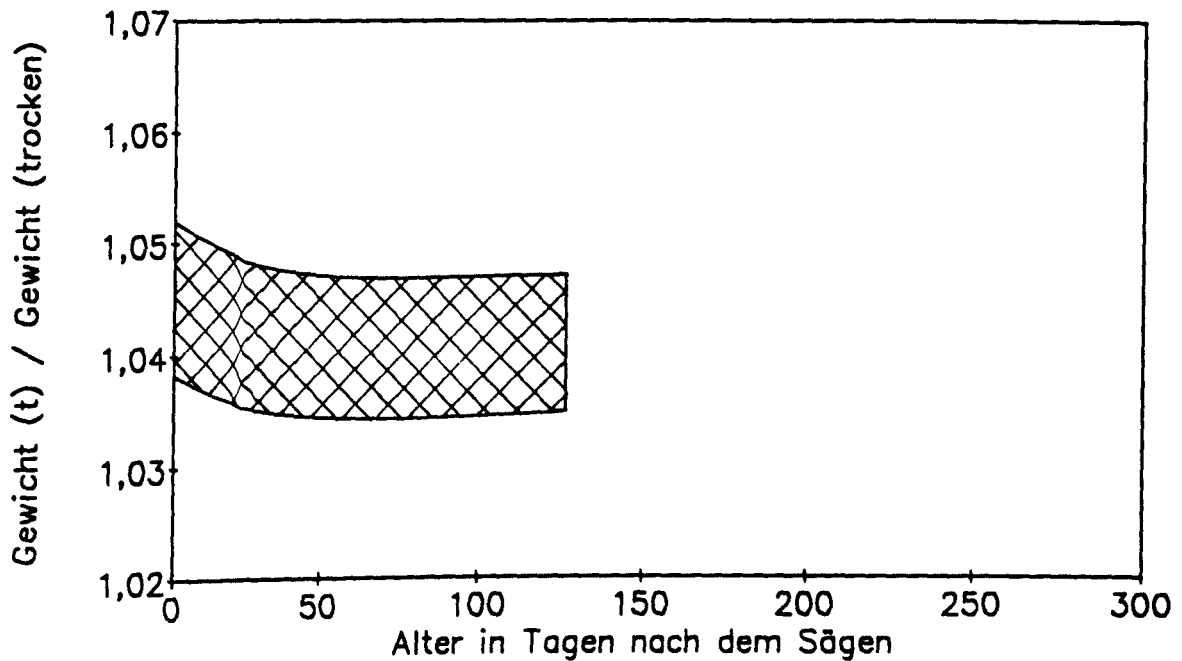


Abbildung 21: Oben: Entwässerung des Betons BPZMS. Unten: Entwässerung des Betons BPZMSFA.

Apparatur zur Prüfung der Sauerstoffpermeabilität  
von Betonproben nach System VDZ

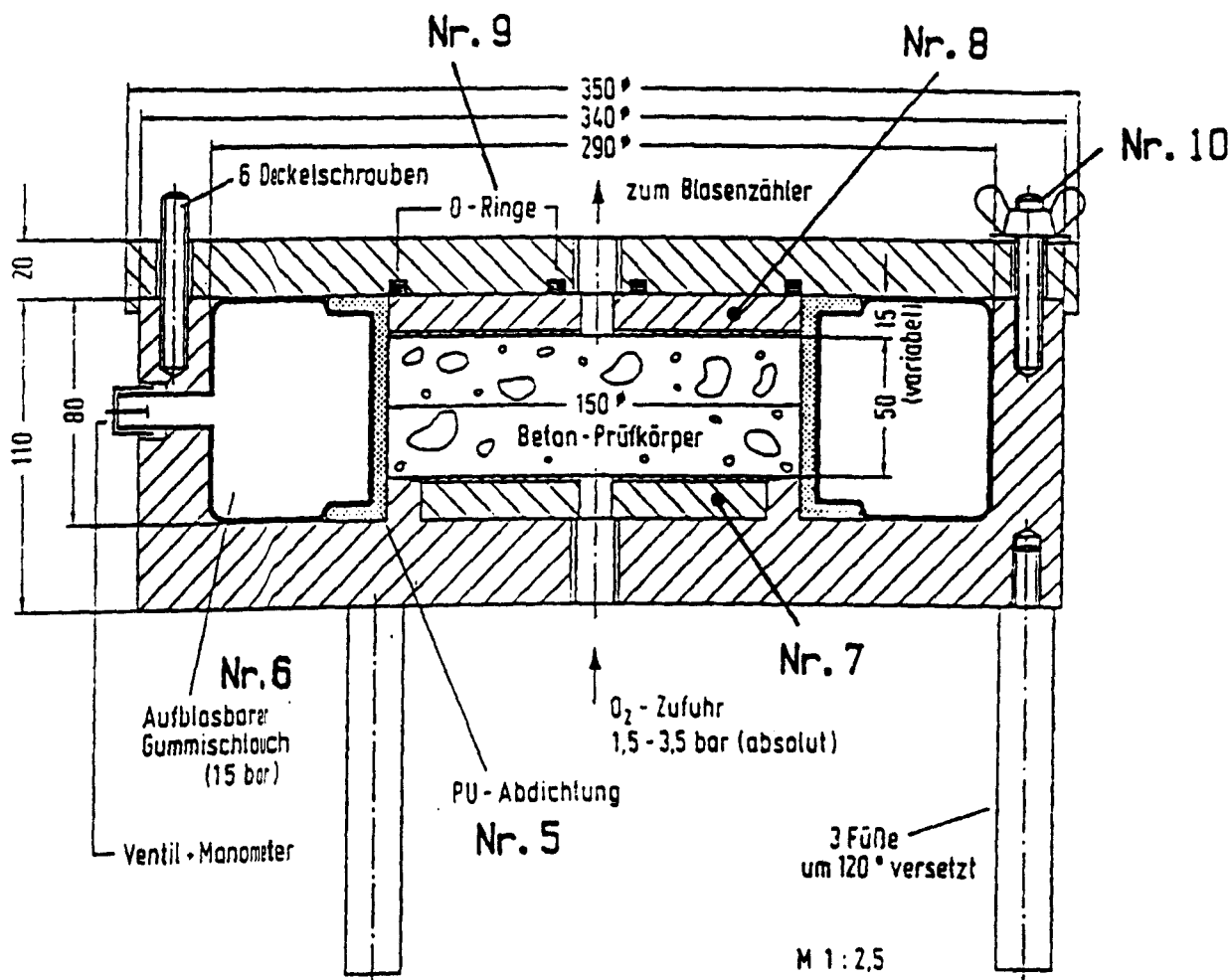


Abbildung 22: Schnittzeichnung der Apparatur zur Messung der Sauerstoffpermeabilität nach System VDZ.

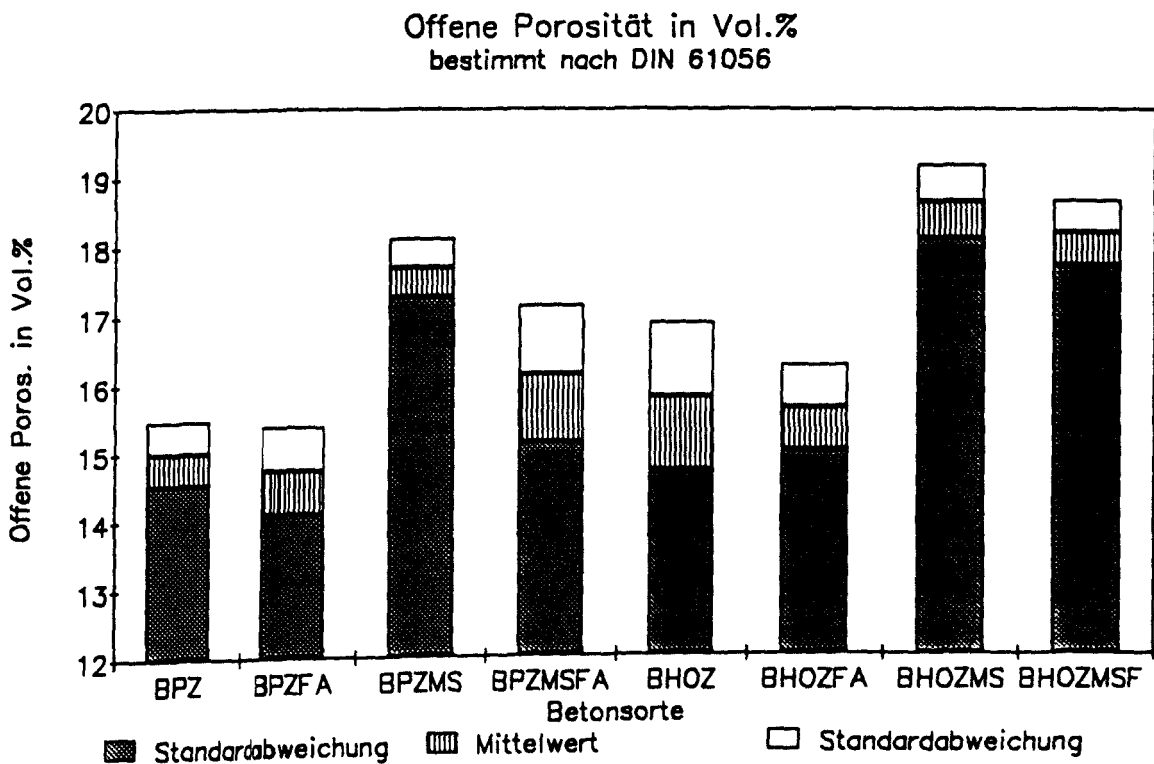
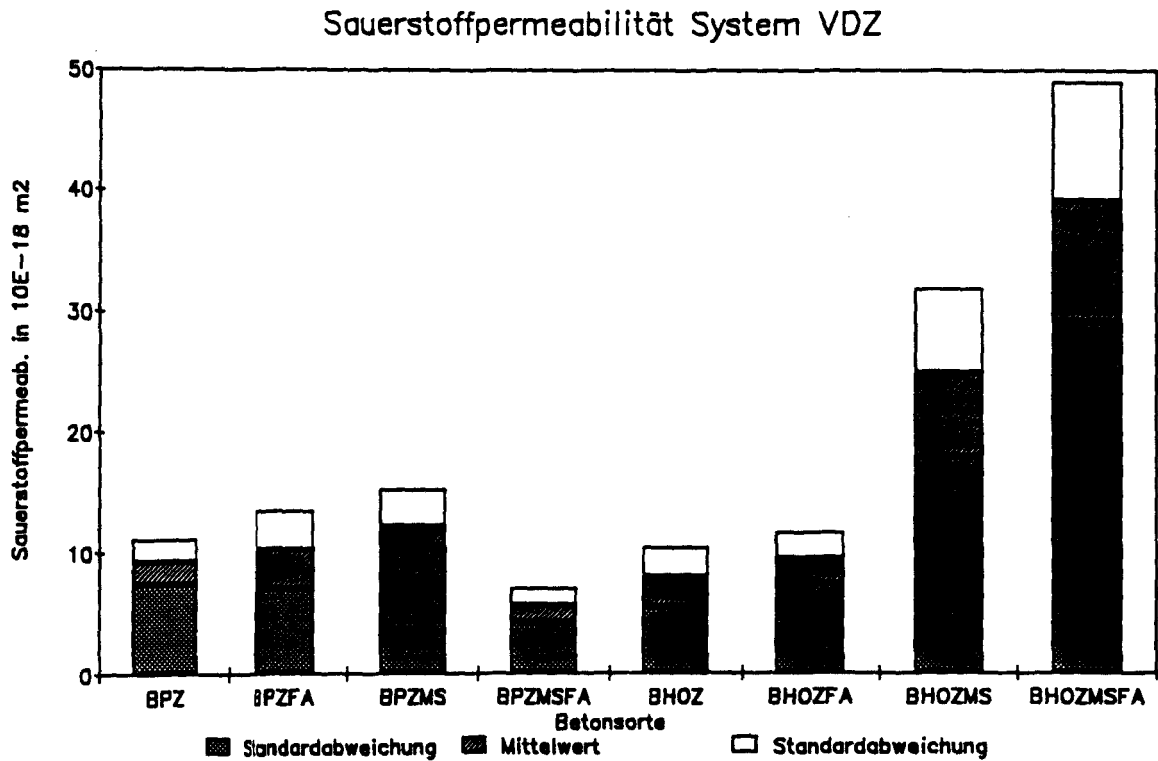


Abbildung 23: Oben: Spezifischer Permeabilitätskoeffizient für Sauerstoff der acht Versuchsbetone in  $10^{-18} \text{ m}^2$ . Unten: Offene Porosität der Versuchsbetone bestimmt durch Tränkung unter Vakuum in Anlehnung an DIN 51056.

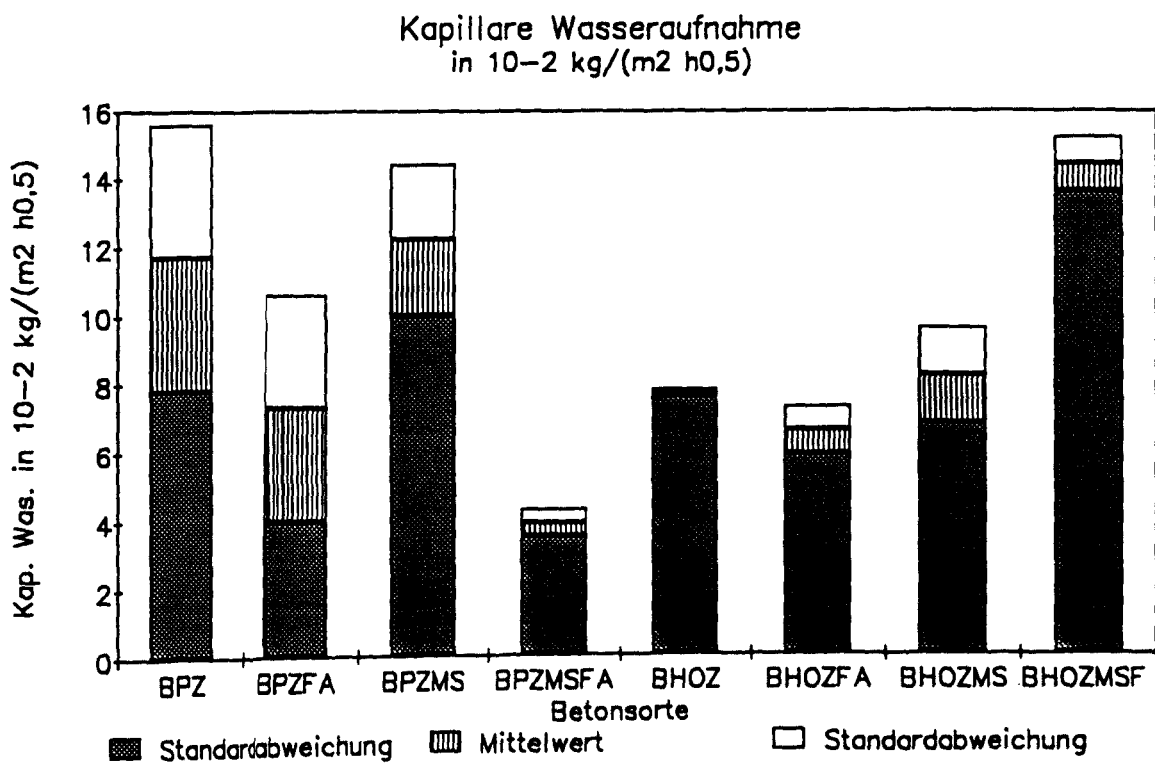


Abbildung 24: Kapillare Wasseraufnahme der acht Versuchsbetone in Anlehnung an DIN 52617 in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ .



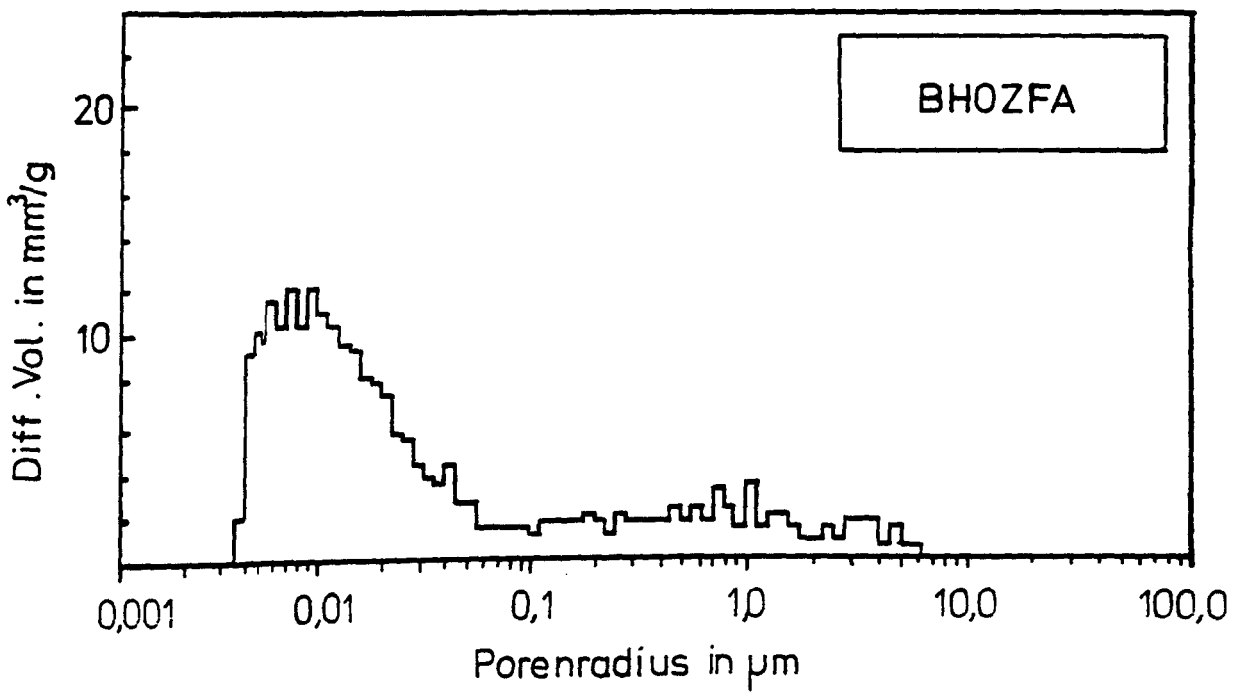
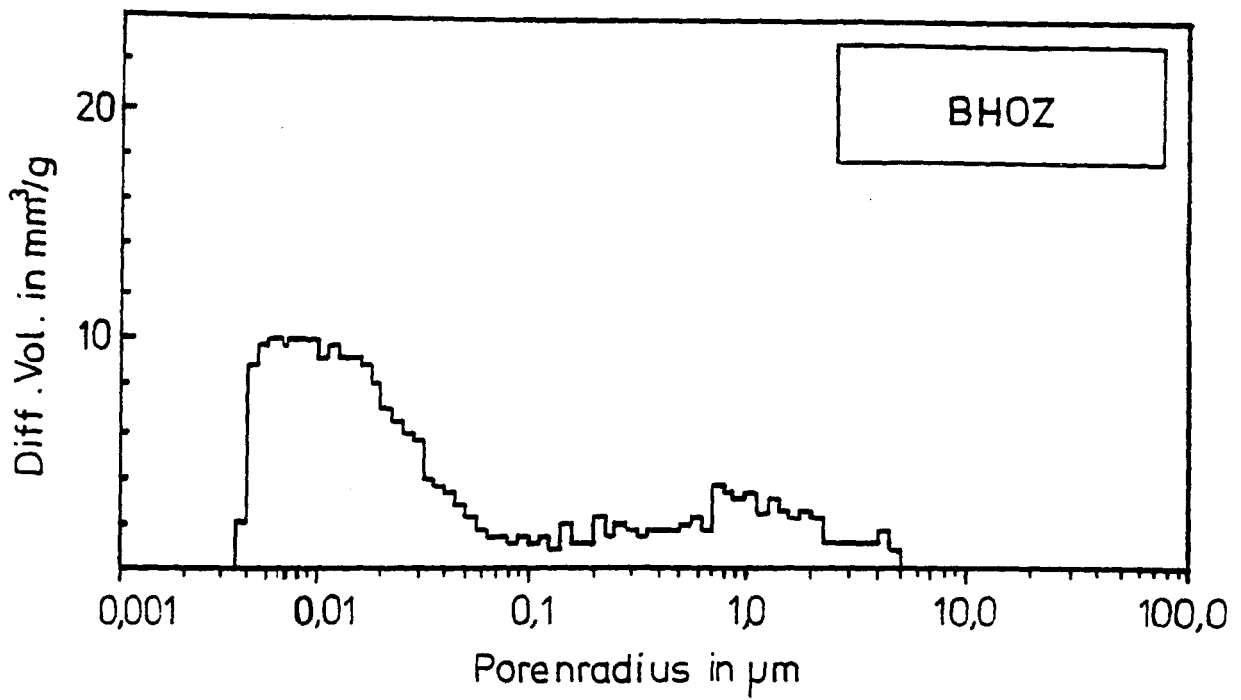


Abbildung 25: Porenradienverteilung aufgenommen über Quecksilberdruckporosimetrie. Oben: Beton BHOZ. Unten: Beton BHOZFA.

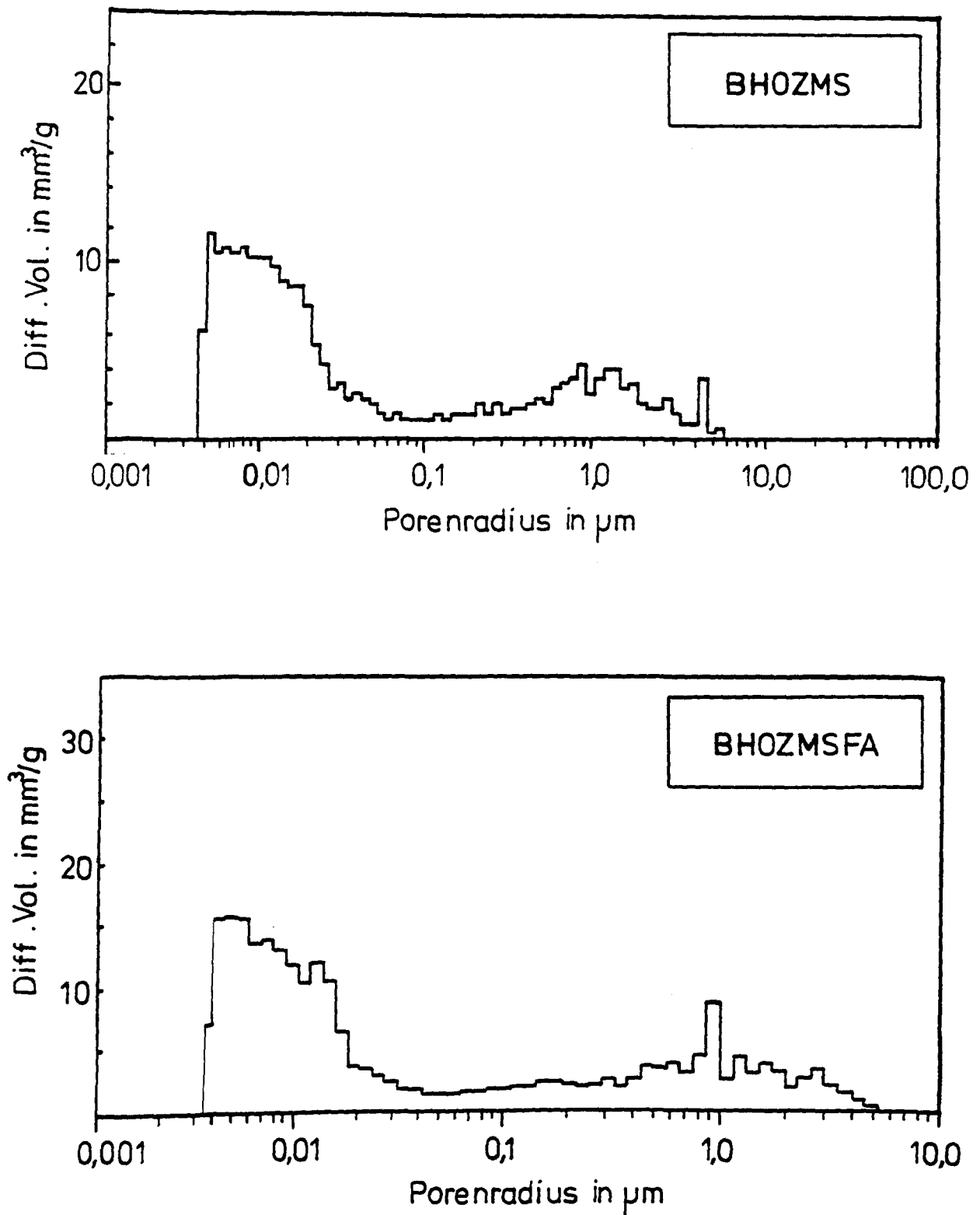


Abbildung 26: Porenradienverteilung aufgenommen über Quecksilberdruckporosimetrie. Oben: Beton BHOZMS. Unten: Beton BHOZMSFA.

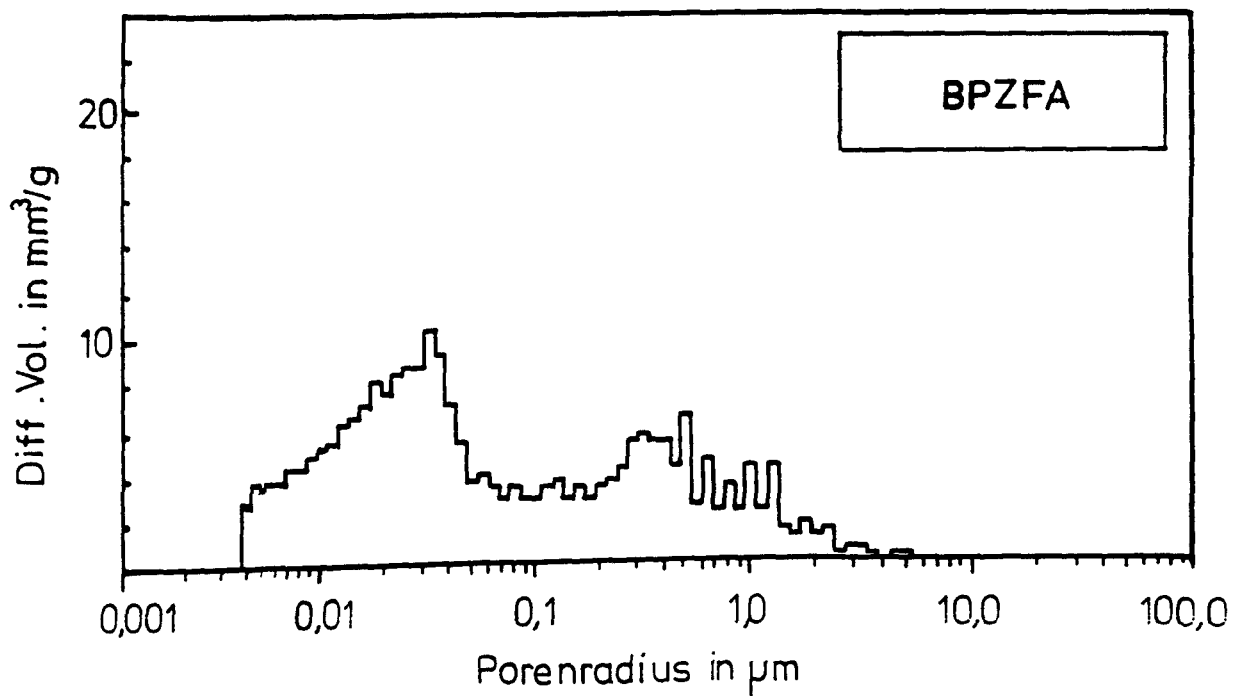
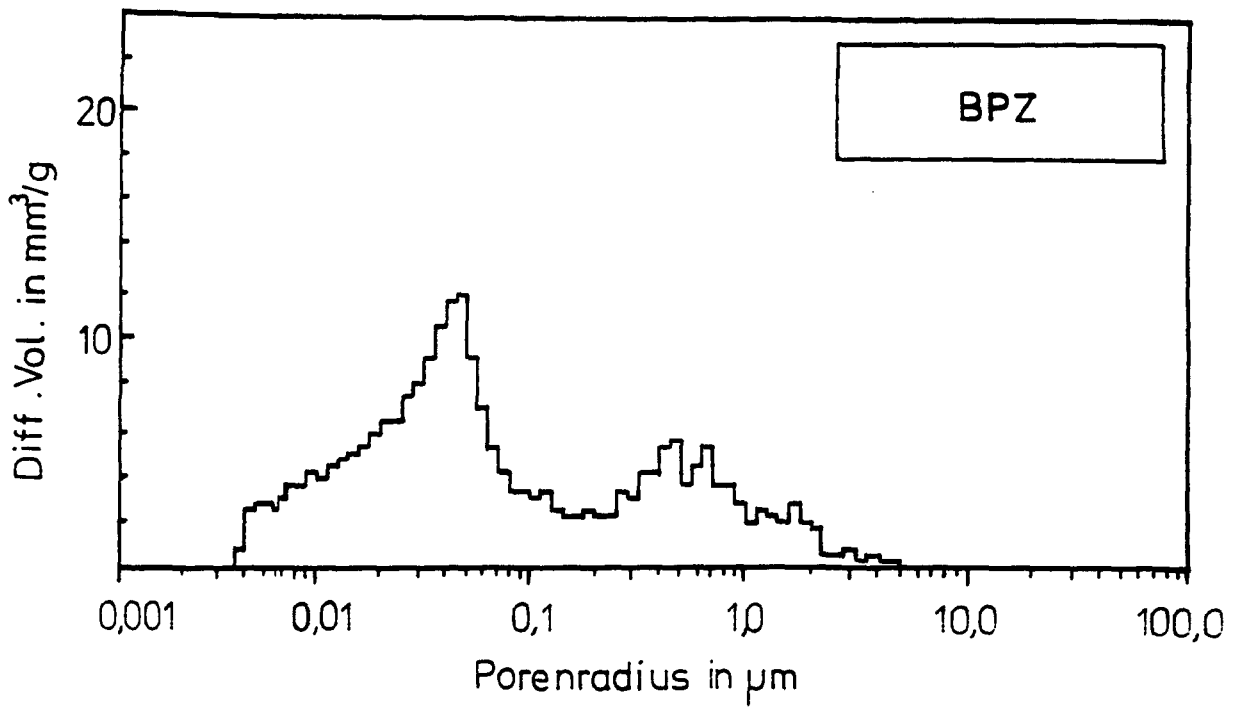


Abbildung 27: Porenradienverteilung aufgenommen über Quecksilberdruckporosimetrie. Oben: Beton BPZ. Unten: Beton BPZFA.

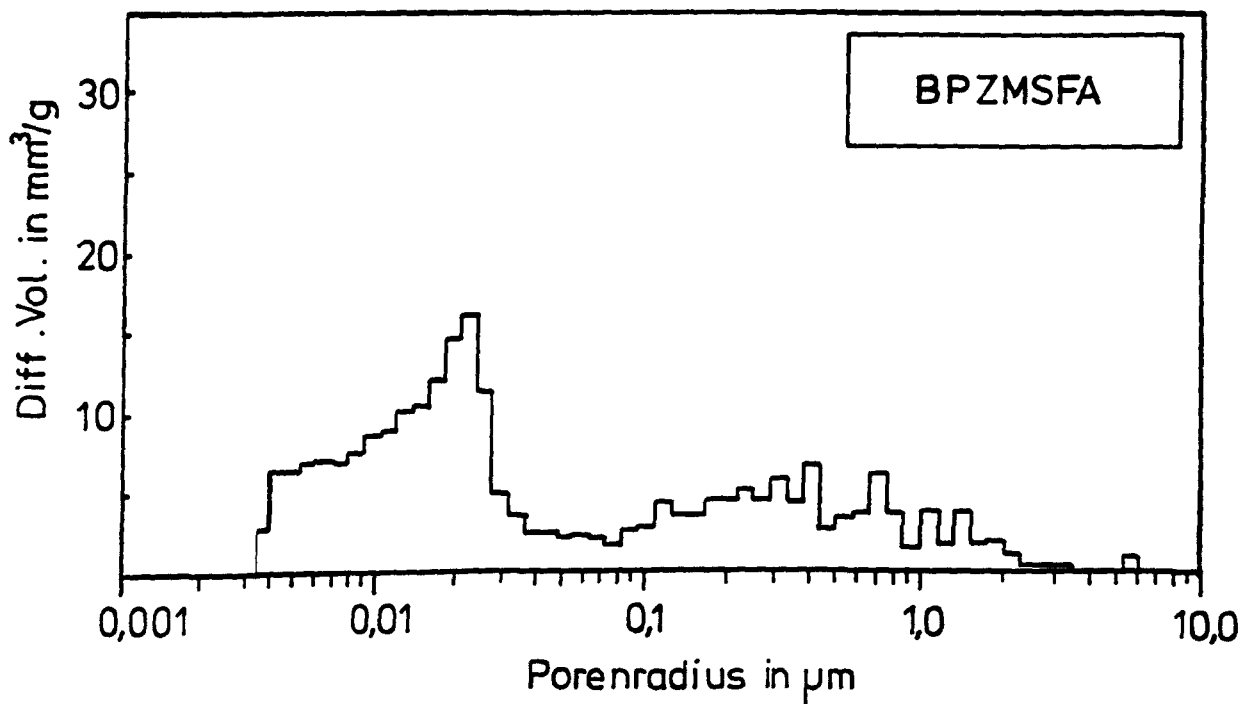
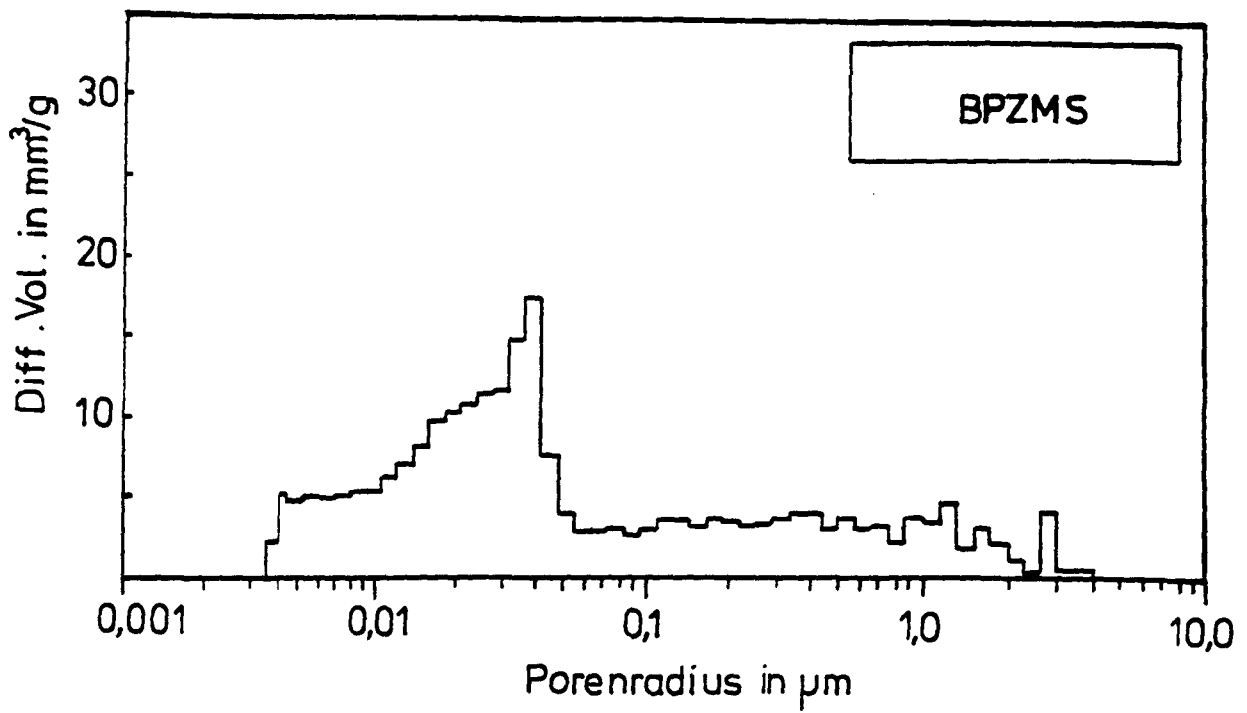


Abbildung 28: Porenradienverteilung aufgenommen über Quecksilberdruckporosimetrie. Oben: Beton BPZMS. Unten: Beton BPZMSFA.

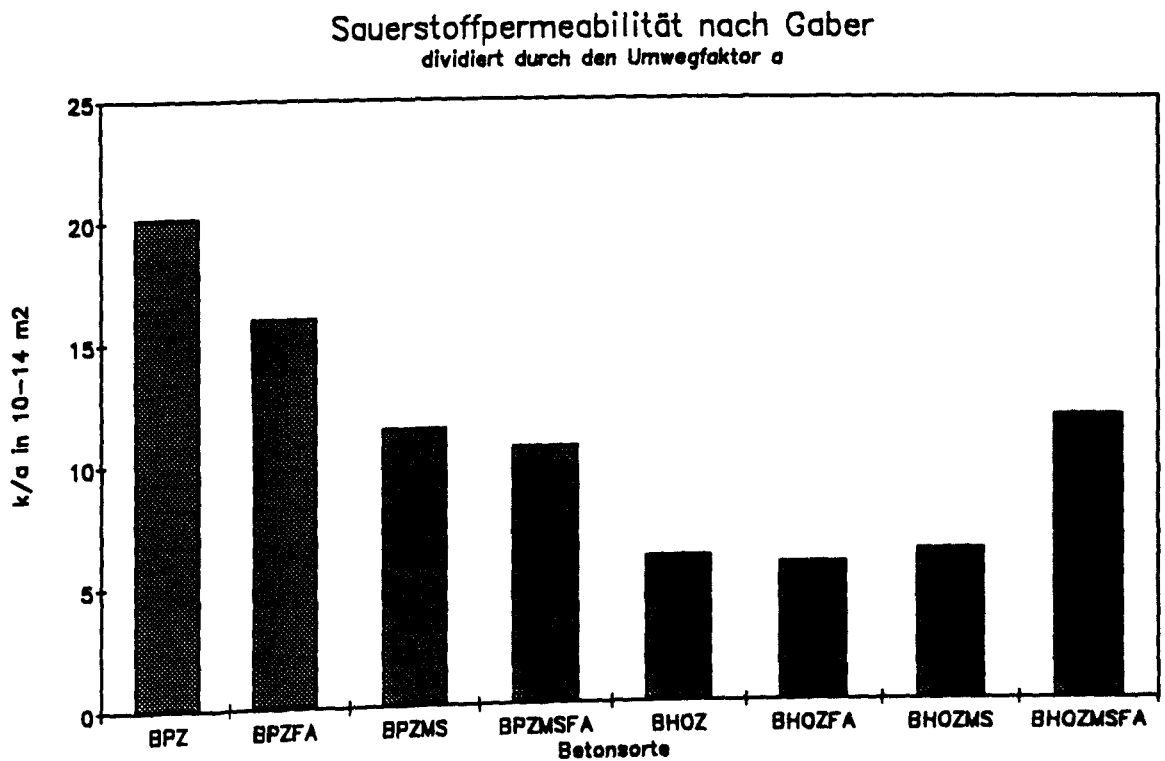
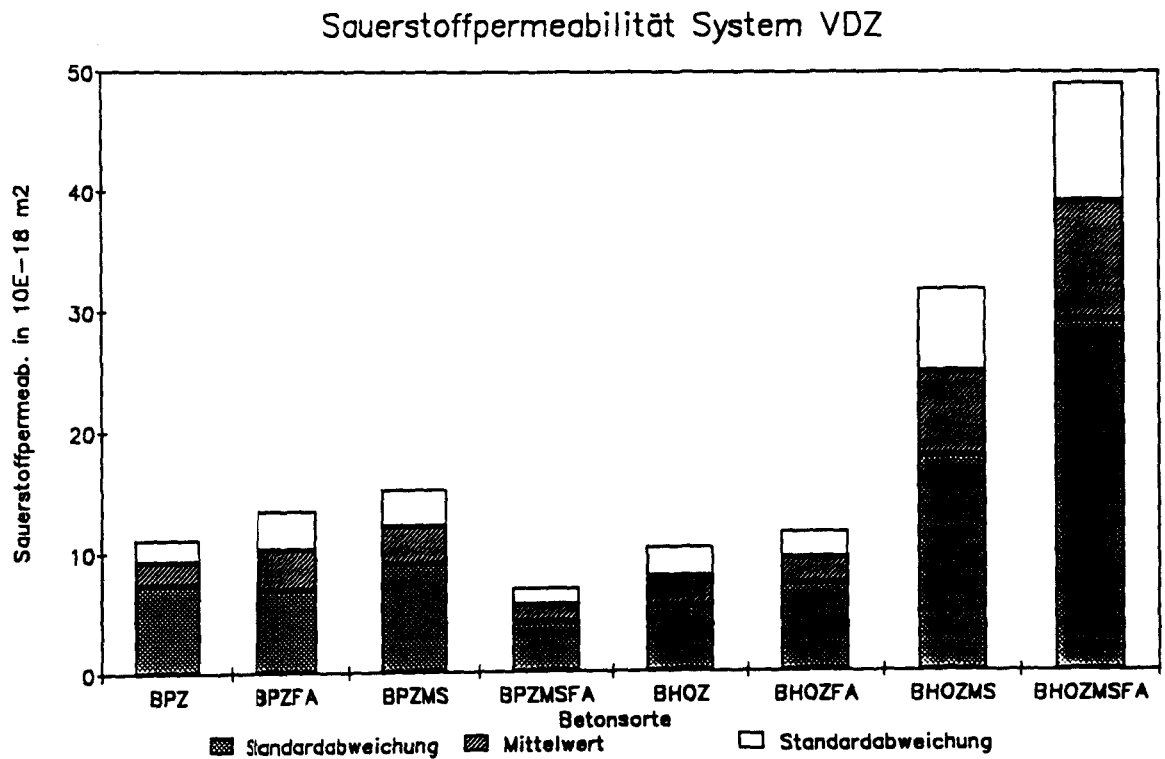
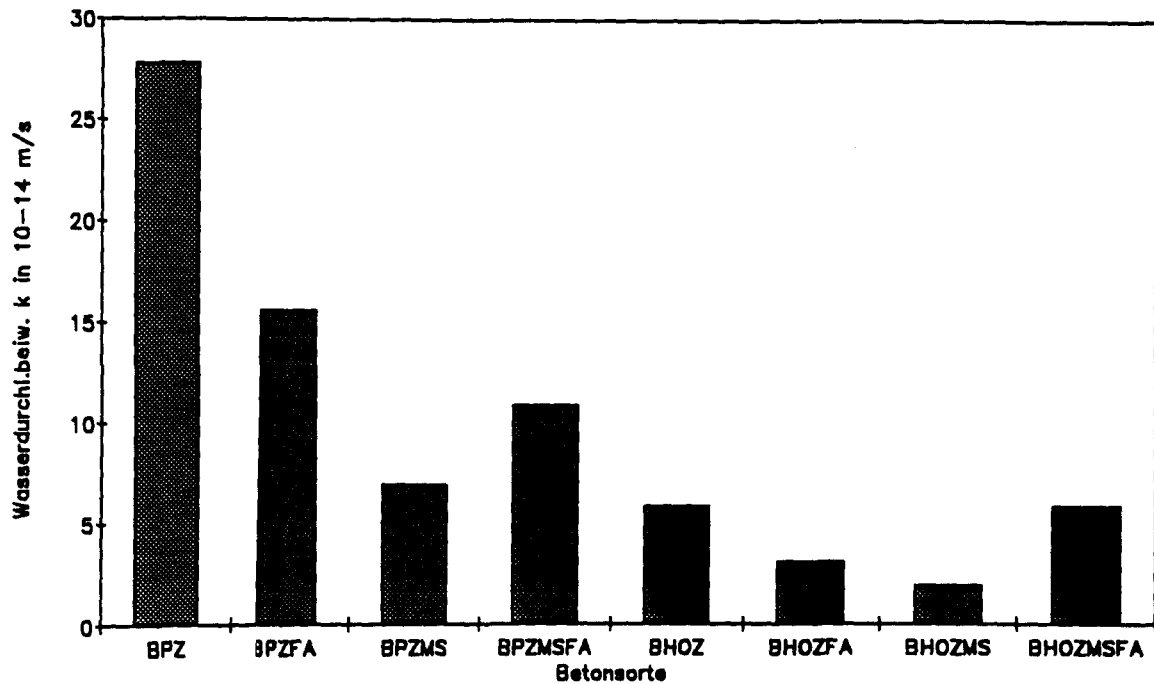


Abbildung 29: Oben: Sauerstoffpermeabilität  $k$  in  $10^{-18} \text{ m}^2$  der acht Versuchsbetone. Unten: Sauerstoffpermeabilität  $k$  dividiert durch den Umwegfaktor  $\alpha$  in  $10^{-14} \text{ m}^2$ , berechnet nach dem Modell 1a von Gaber.

Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k$   
Näherung aus der Wassereindringtiefe



Permeabilität für Wasser nach Gaber  
dividiert durch den Umwegfaktor  $\alpha$

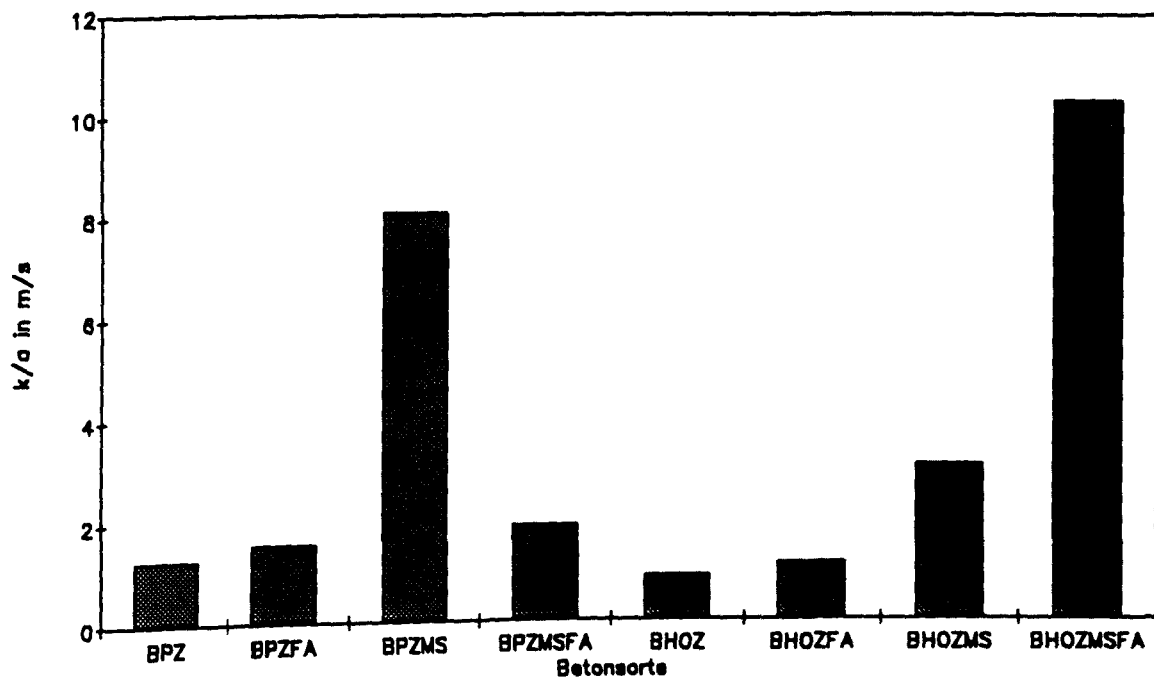


Abbildung 30: Oben: Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k$  in  $10^{-14}$  m/s der acht Versuchsbetone, näherungsweise bestimmt aus der Wassereindringtiefe. Unten: Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k$  dividiert durch den Umwegfaktor  $\alpha$  in m/s, berechnet nach dem Modell 1a von Gaber.

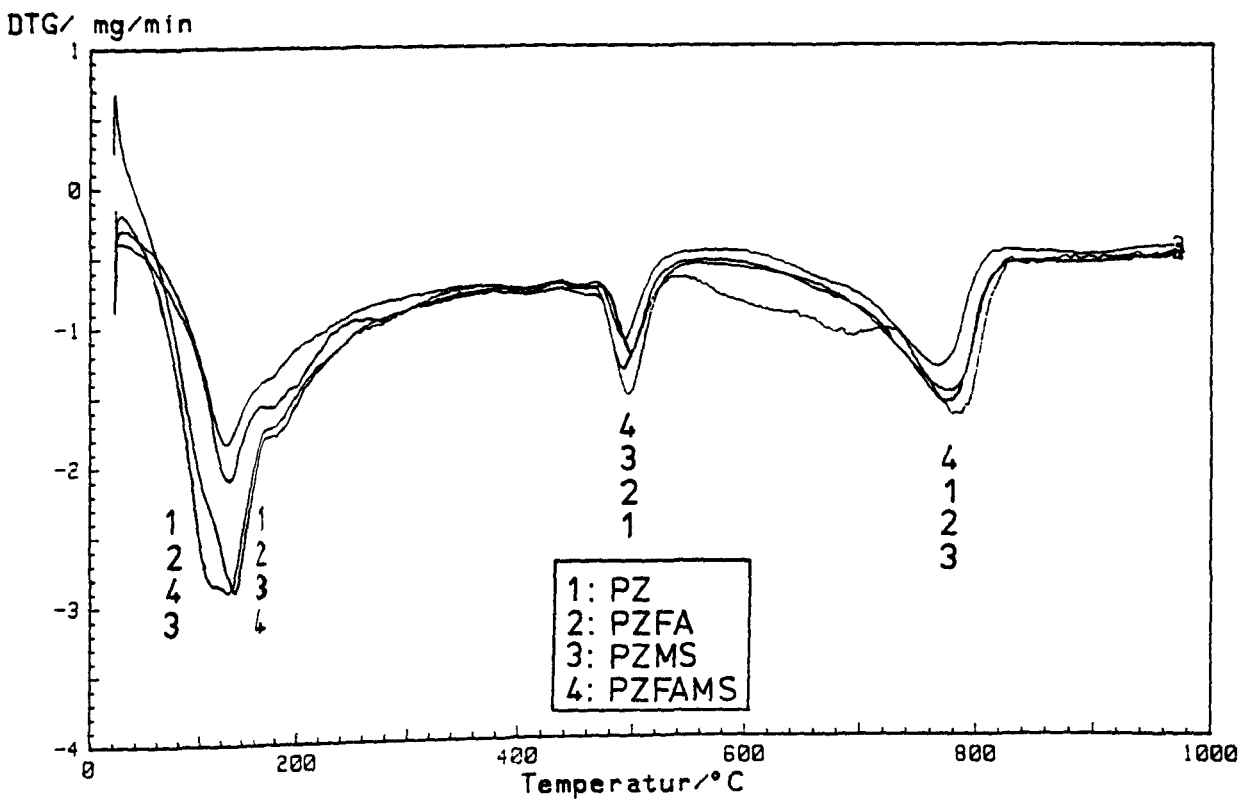
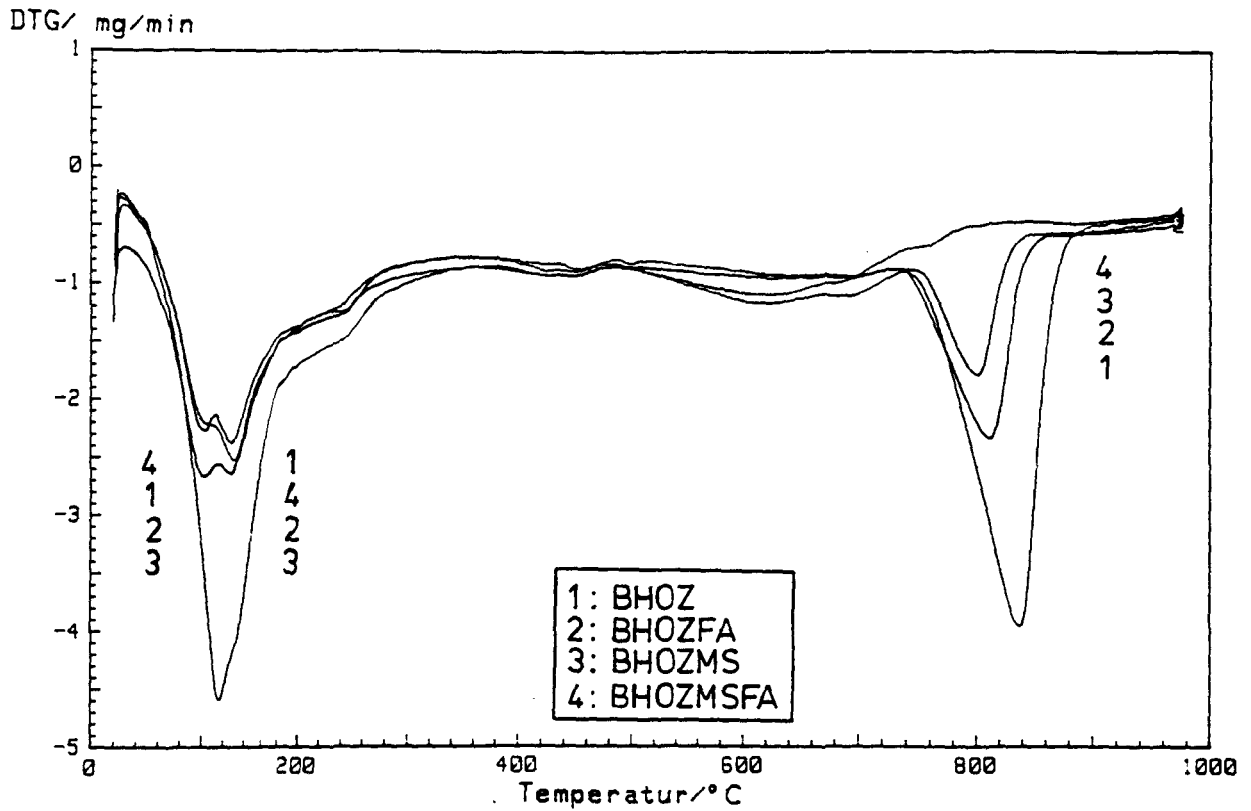


Abbildung 31: Verlauf der DTG Kurve zwischen 20 und 980°C. Oben: Betone mit Hochofenzement. Unten: Betone mit Portlandzement.

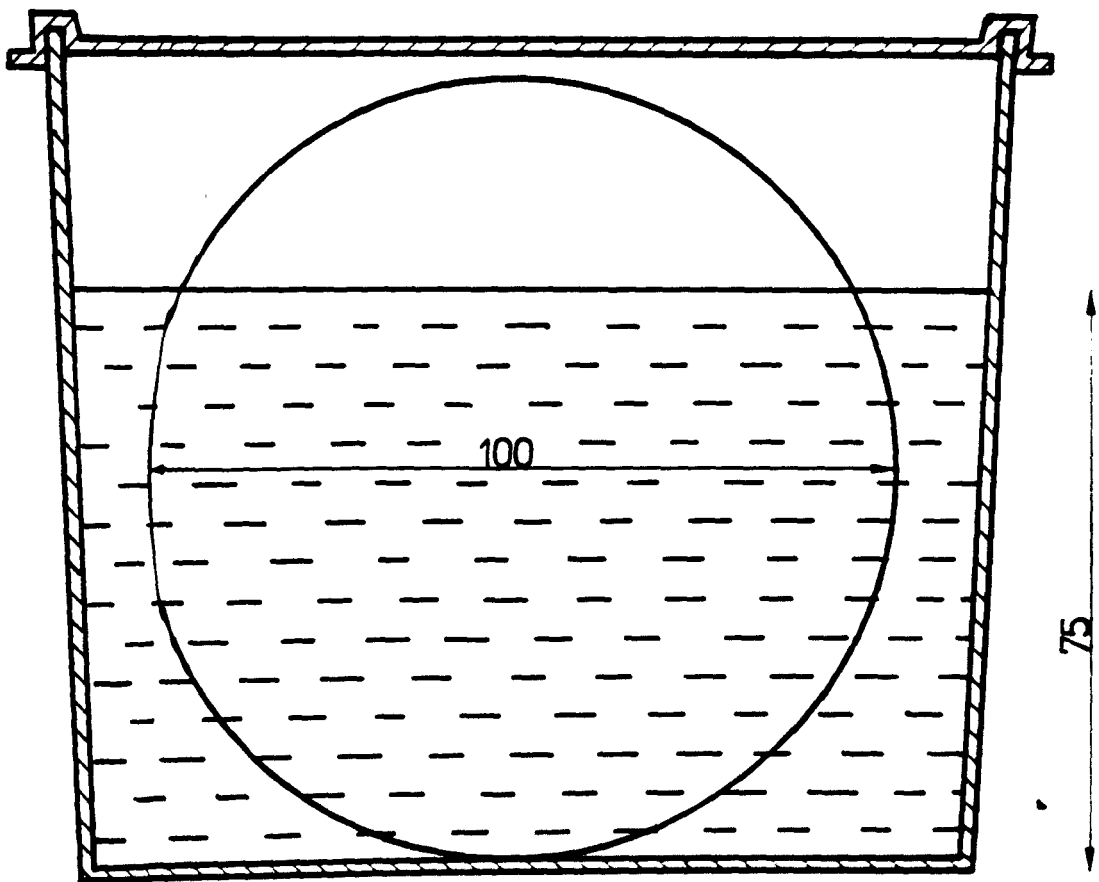


Abbildung 32: Drucklose Einlagerung der Betonproben in den korrosiven Flüssigkeiten.



Apparatur zur Beaufschlagung von Betonproben  
mit aggressiven Flüssigkeiten bis  
zu 10 bar Druck (Eigenbau iBMB)

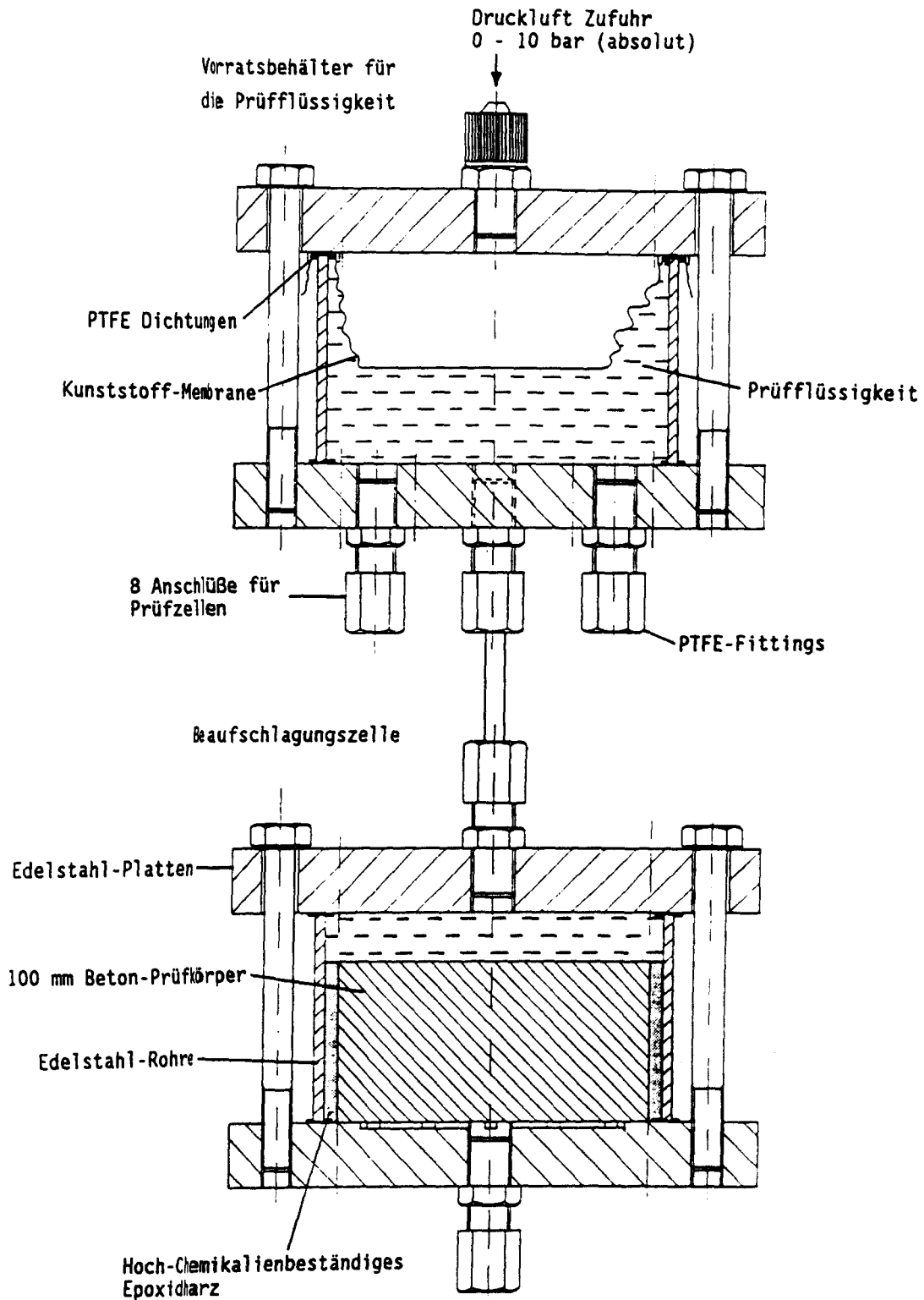


Abbildung 33: Druckapparatur zur Beaufschlagung mit der Flüssigkeit LÖ2 unter  
10 bar Druck.

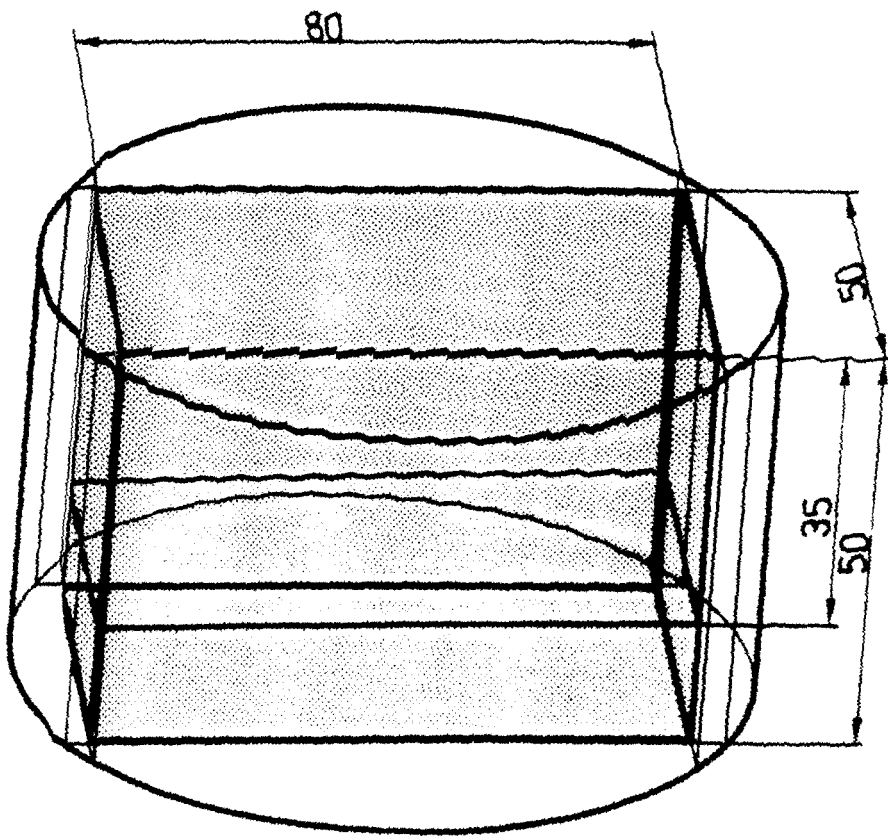


Abbildung 34: Präparation der Betonproben nach dem Beaufschlagen.

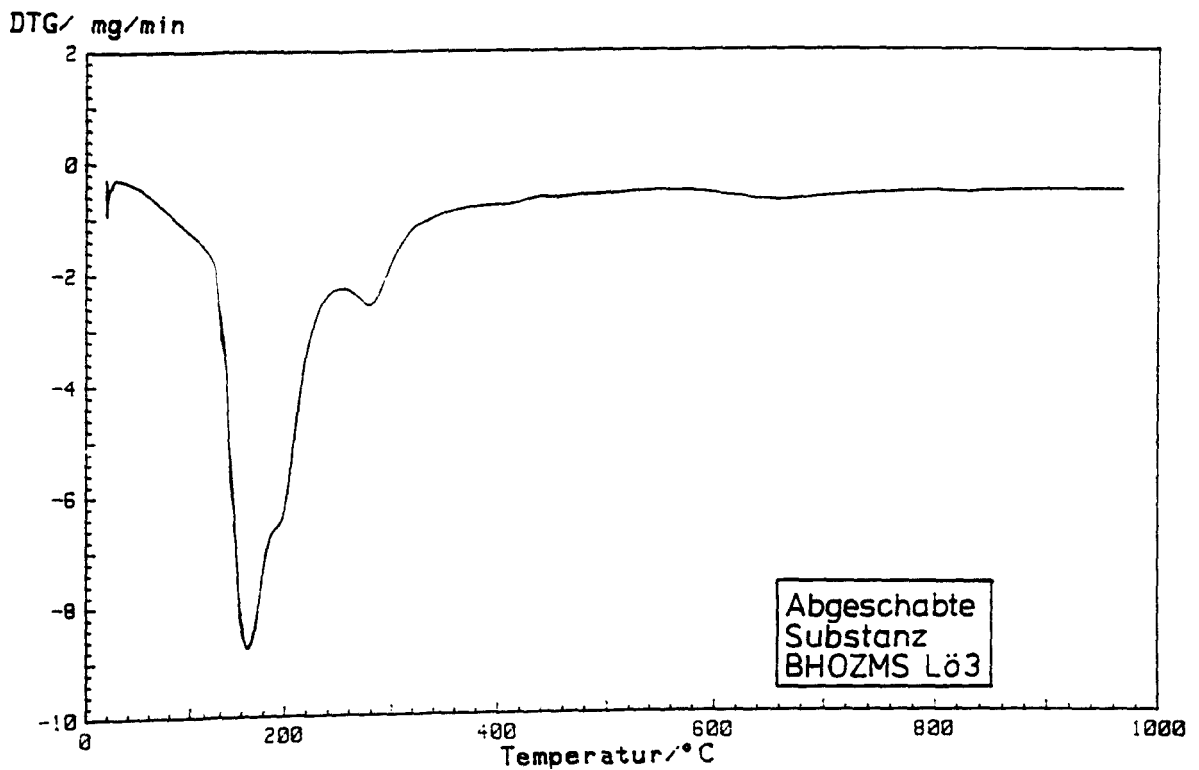
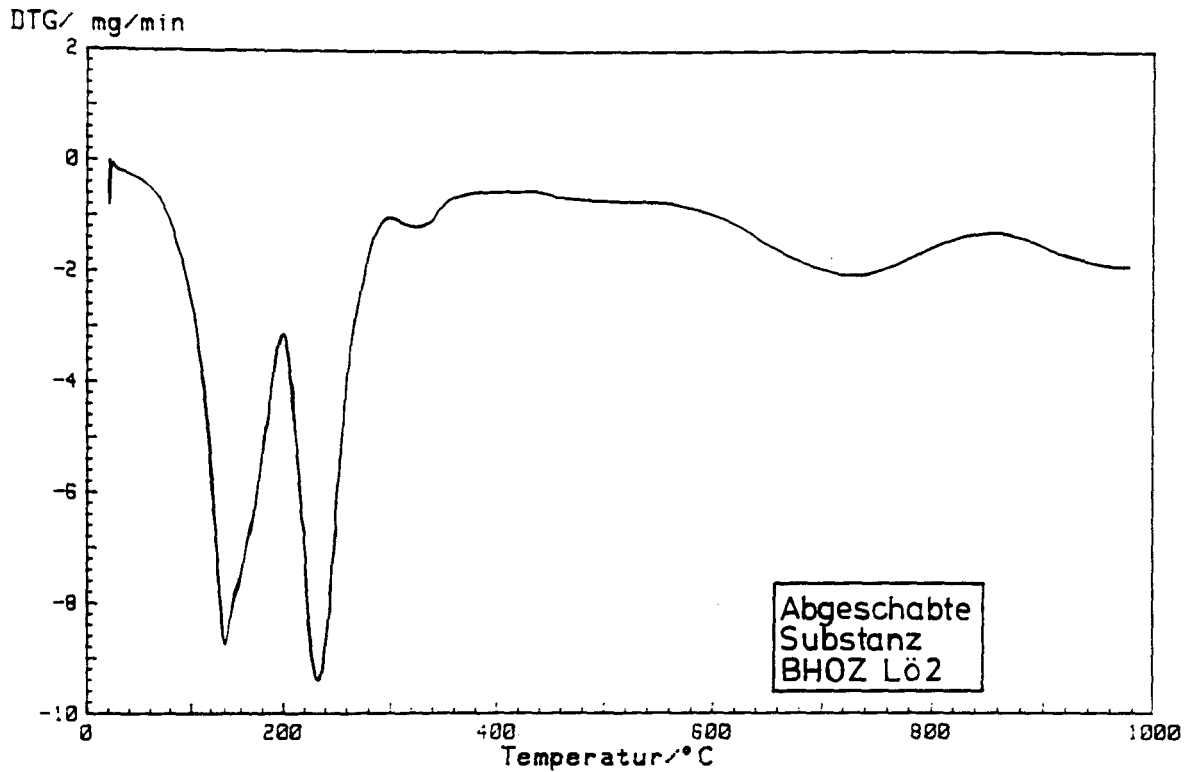


Abbildung 35: DTG Analyse der Kristalle an der Oberfläche der Betone nach dem Beaufschlagen. Oben: Nach Einlagerung in die Flüssigkeit L02. Unten: Nach Einlagerung in die Flüssigkeit L03.

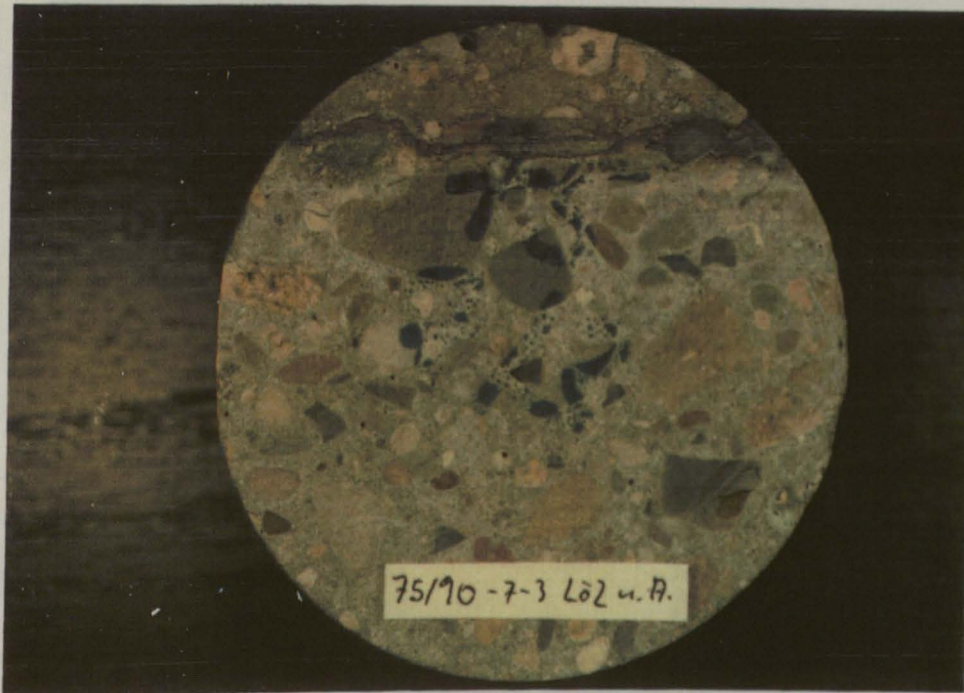


Abbildung 36: Oben: Beton BPZ nach Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ2, Zustand vor der Reinigung. Unten: Beton BPZ nach Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ2.





Abbildung 37: Oben: Beton BPZ während der Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ2+Org. Unten: Beton BPZ nach Einlagerung in die Flüssigkeit LÖ3, Zustand vor der Reinigung.



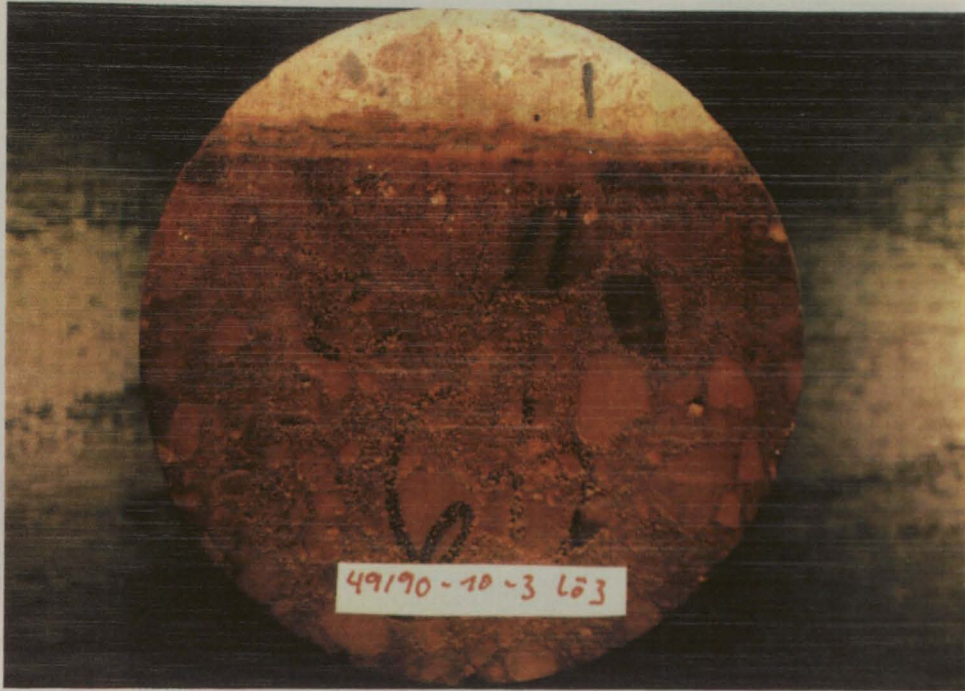


Abbildung 38: Oben: Beton BHOZMS nach Einlagerung in die Flüssigkeit L63, Zustand vor der Reinigung. Unten: Beton BHOZMS nach Einlagerung in die Flüssigkeit L63 und Reinigung.





Abbildung 39: Oben: Beton BHOZFA während der Einlagerung in die Flüssigkeit SDH. Unten: Beton BHOZFA nach der Einlagerung in die Flüssigkeit SDH und Reinigung.

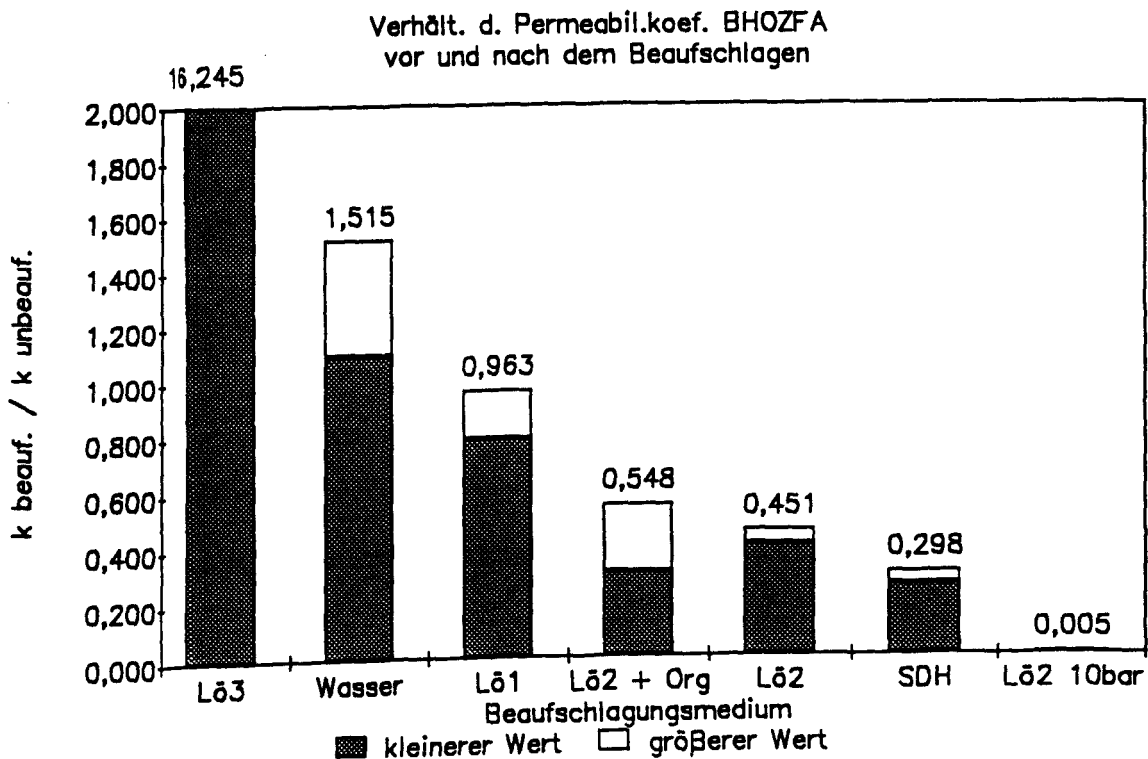
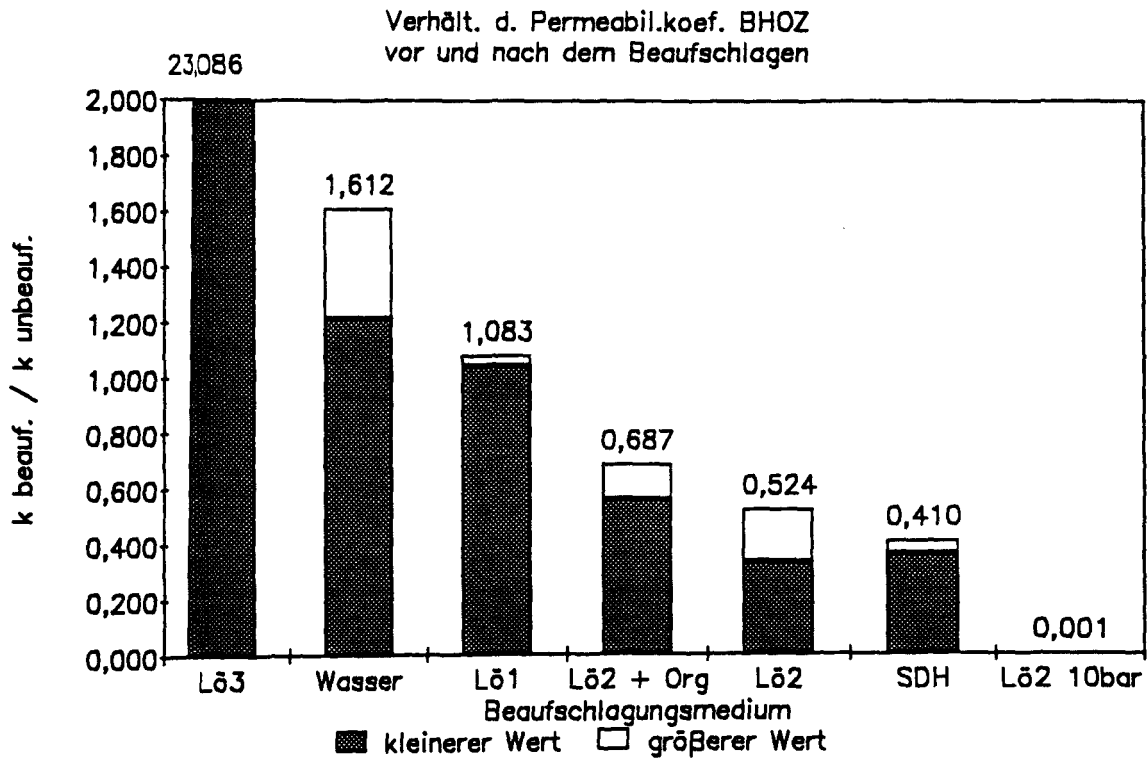


Abbildung 40: Verhältnis der Permeabilitätskoeffizienten vor und nach dem Beaufschlagen. Oben: Beton BHOZ. Unten: Beton BHOZFA.



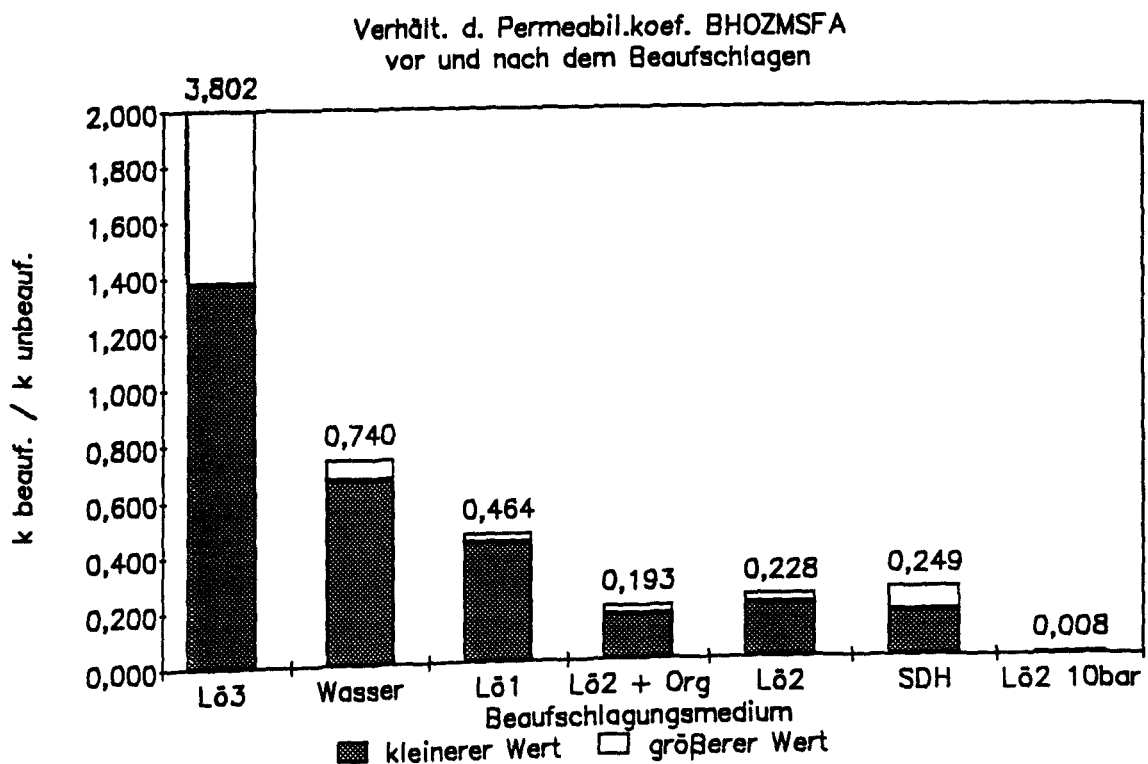
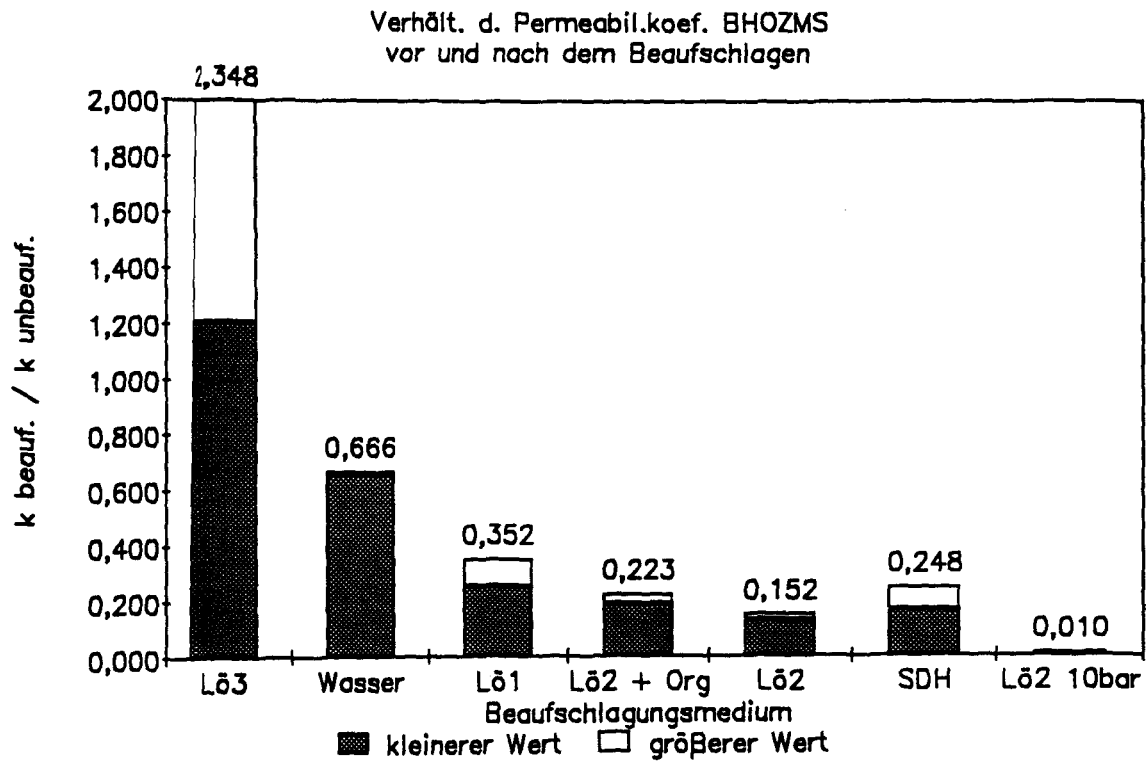


Abbildung 4): Verhältnis der Permeabilitätskoeffizienten vor und nach dem Beaufschlagen. Oben: Beton BHOZMS. Unten: Beton BHOZMSFA.

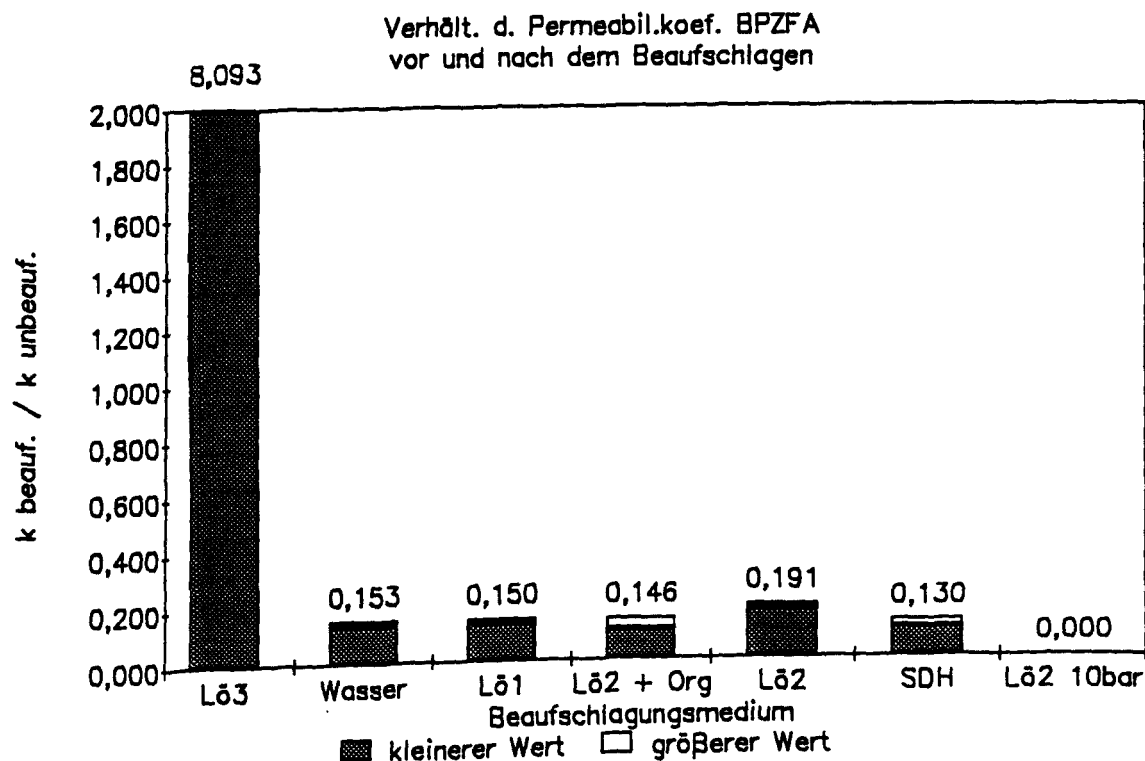
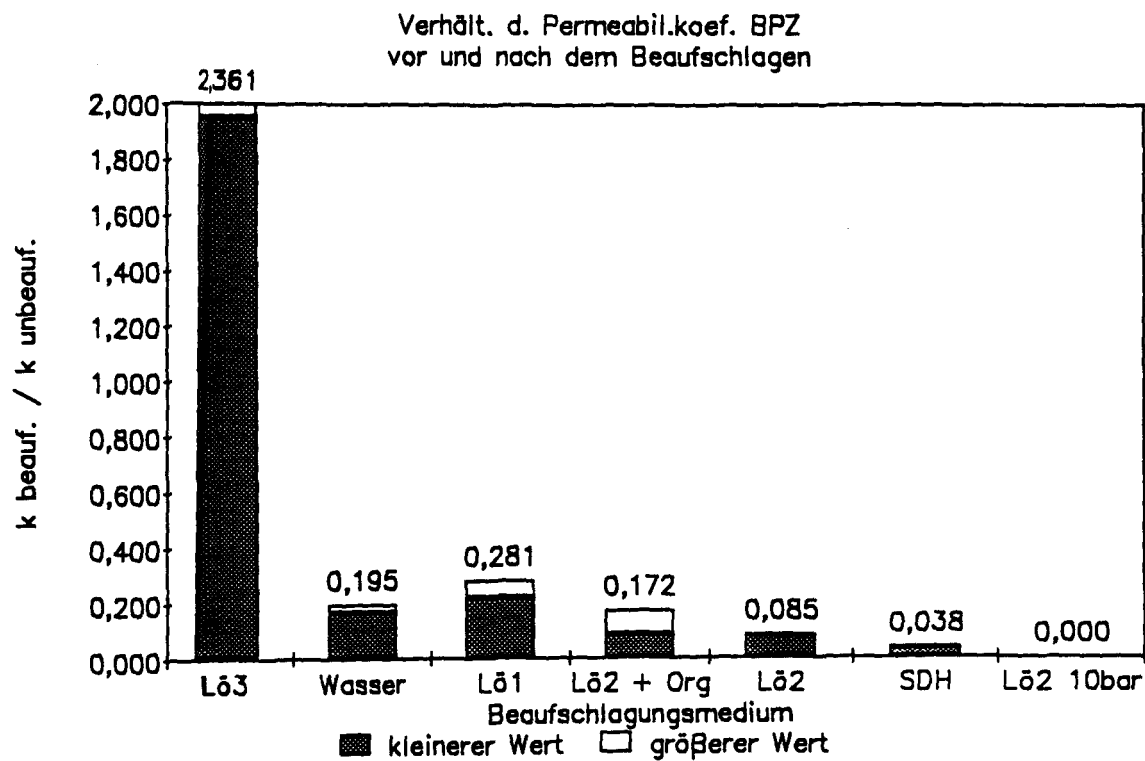


Abbildung 42: Verhältnis der Permeabilitätskoeffizienten vor und nach dem Beaufschlagen. Oben: Beton BPZ. Unten: Beton BPZFA.

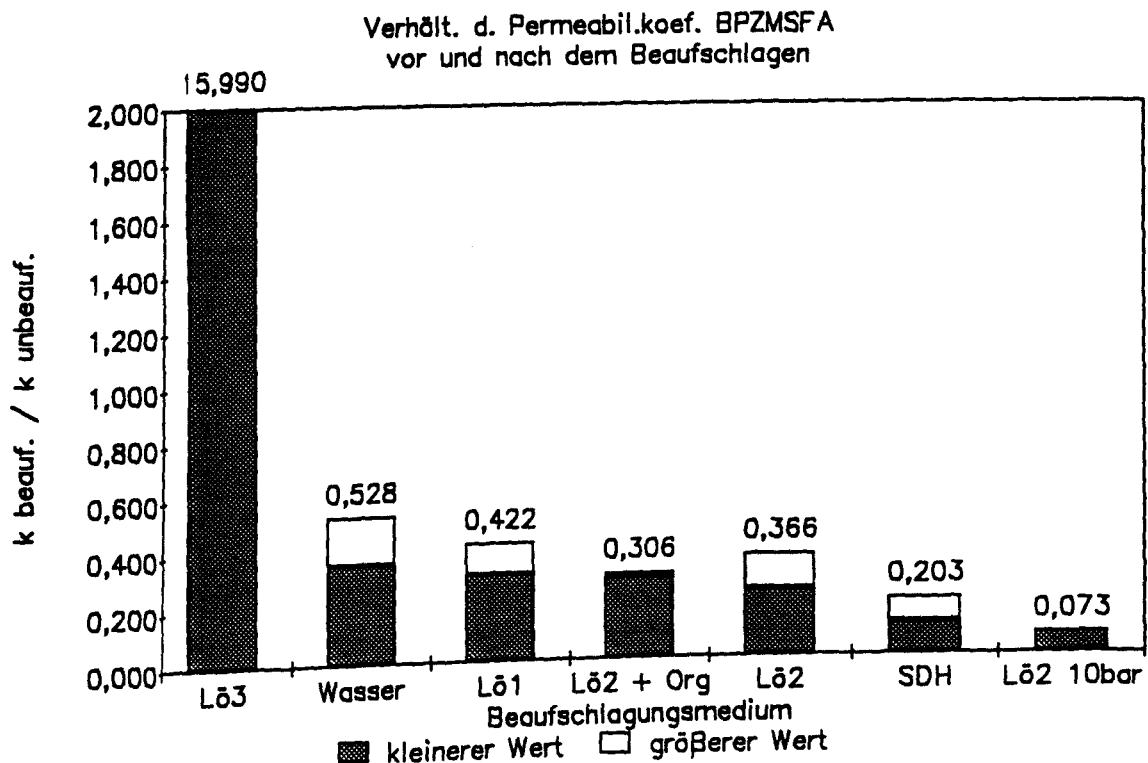
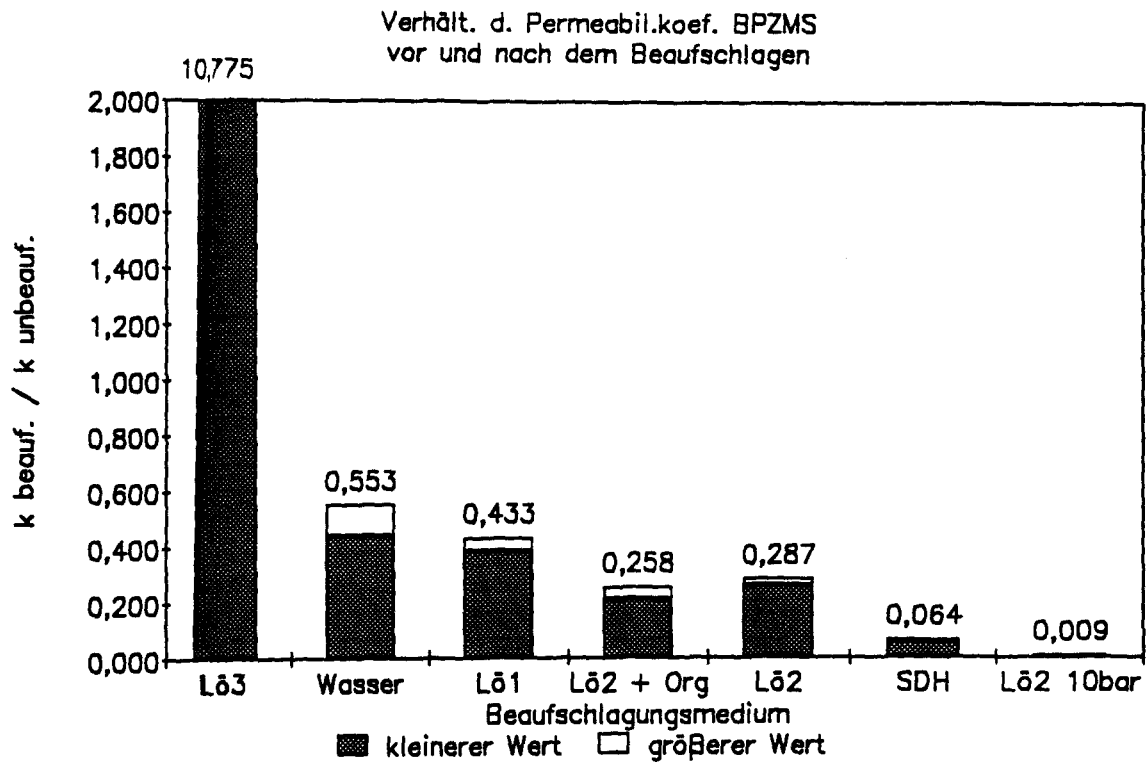


Abbildung 43: Verhältnis der Permeabilitätskoeffizienten vor und nach dem Beaufschlagen. Oben: Beton BPZMS. Unten: Beton BPZMSFA.

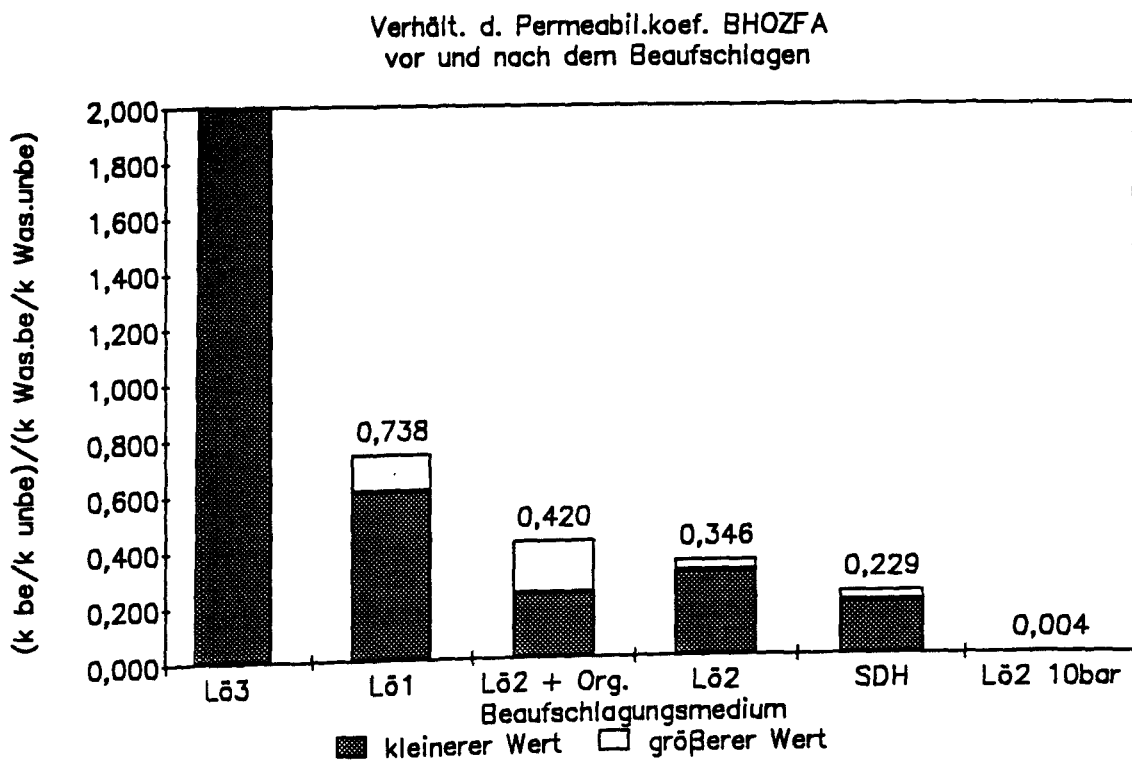
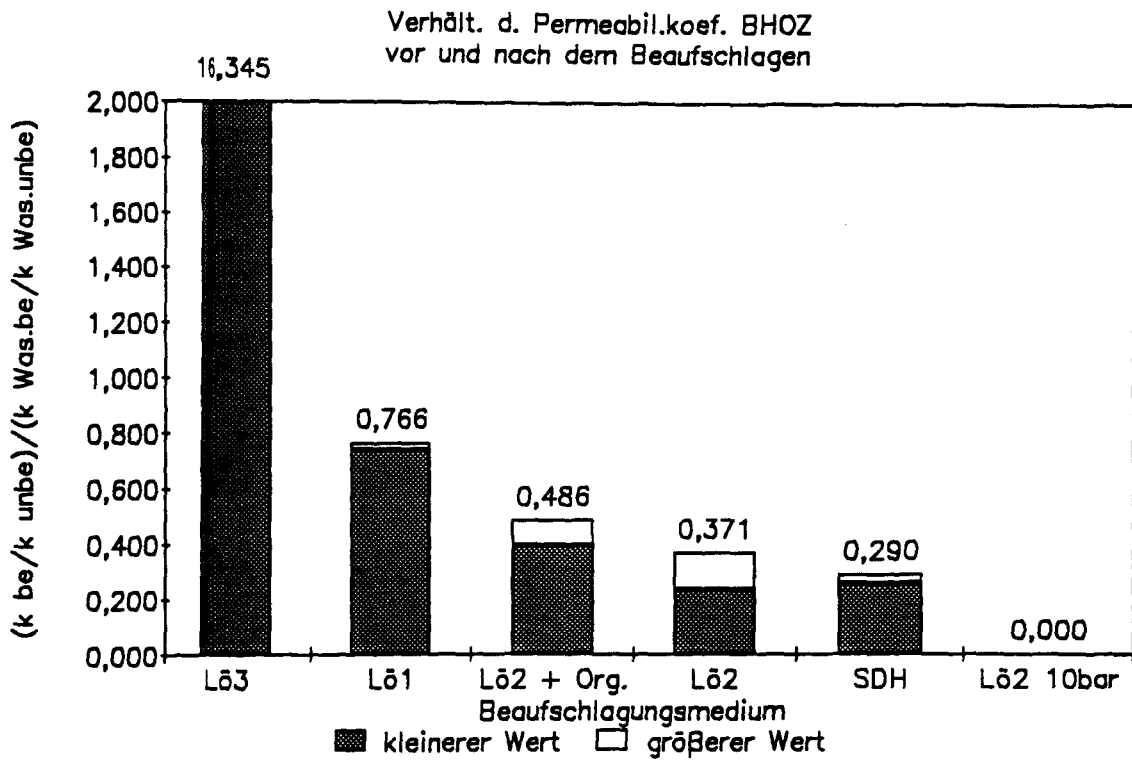


Abbildung 44: Verhältnis der Permeabilitätskoeffizienten vor und nach dem Beaufschlagen, bezogen auf das Verhältnis bei Wasserlagerung. Oben: Beton BHOZ. Unten: Beton BHOZFA.

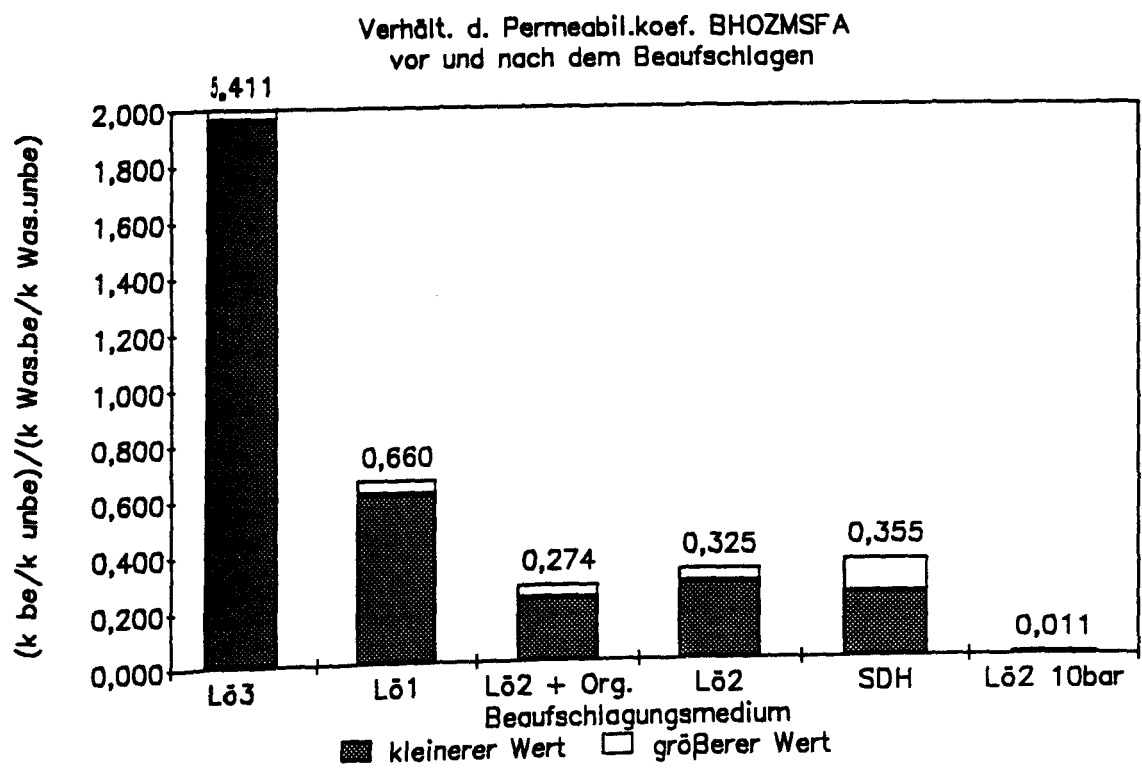
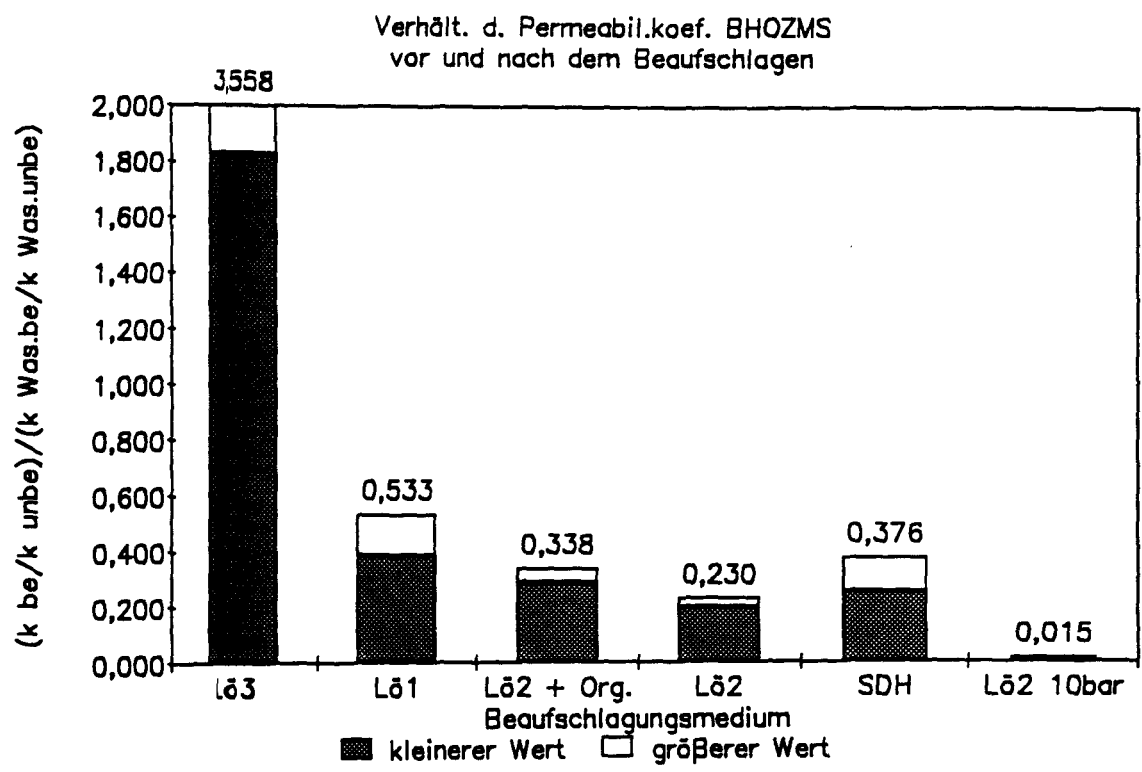


Abbildung 45: Verhältnis der Permeabilitätskoeffizienten vor und nach dem Beaufschlagen, bezogen auf das Verhältnis bei Wasserlagerung. Oben: Beton BHOZMS. Unten: Beton BHOZMSFA.

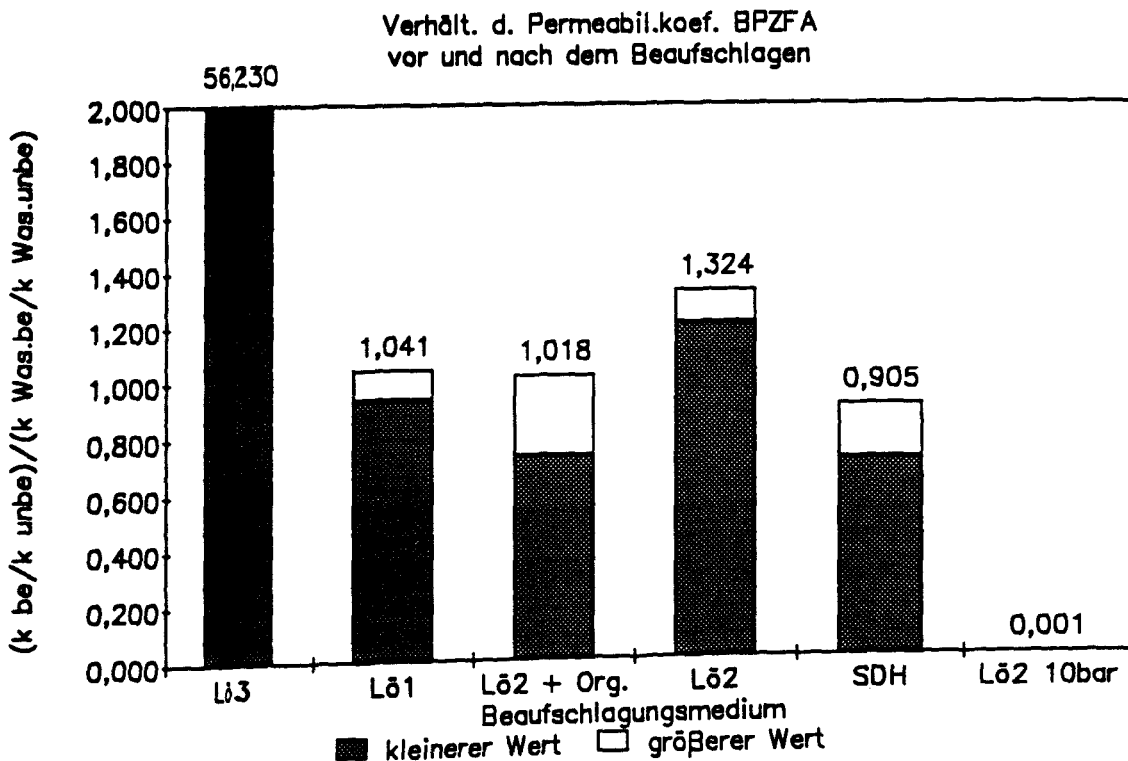
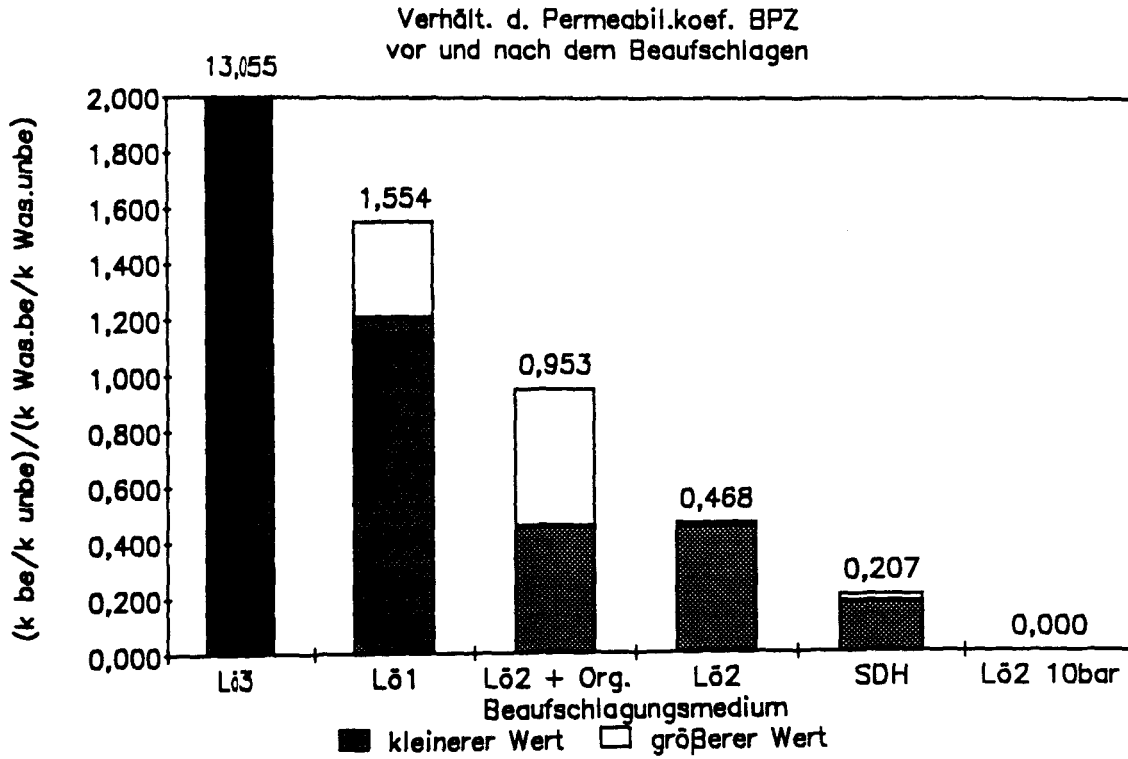


Abbildung 46: Verhältnis der Permeabilitätskoeffizienten vor und nach dem Beaufschlagen, bezogen auf das Verhältnis bei Wasserlagerung. Oben: Beton BPZ. Unten: Beton BPZFA.

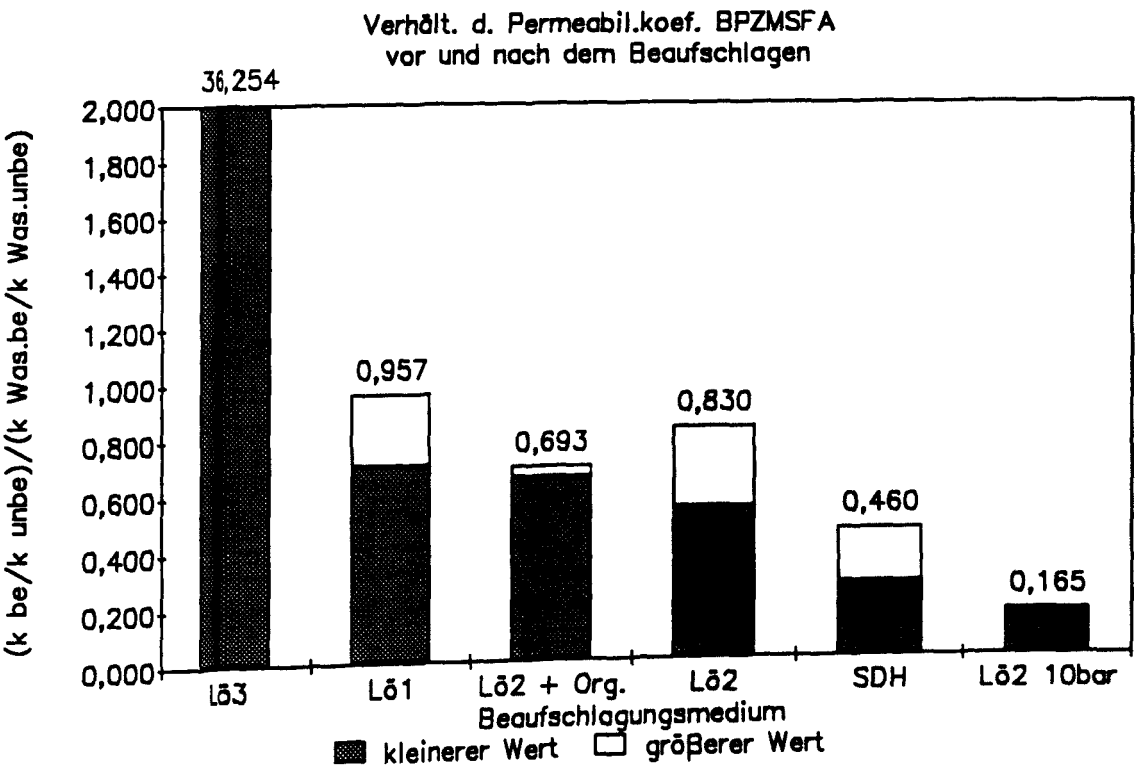
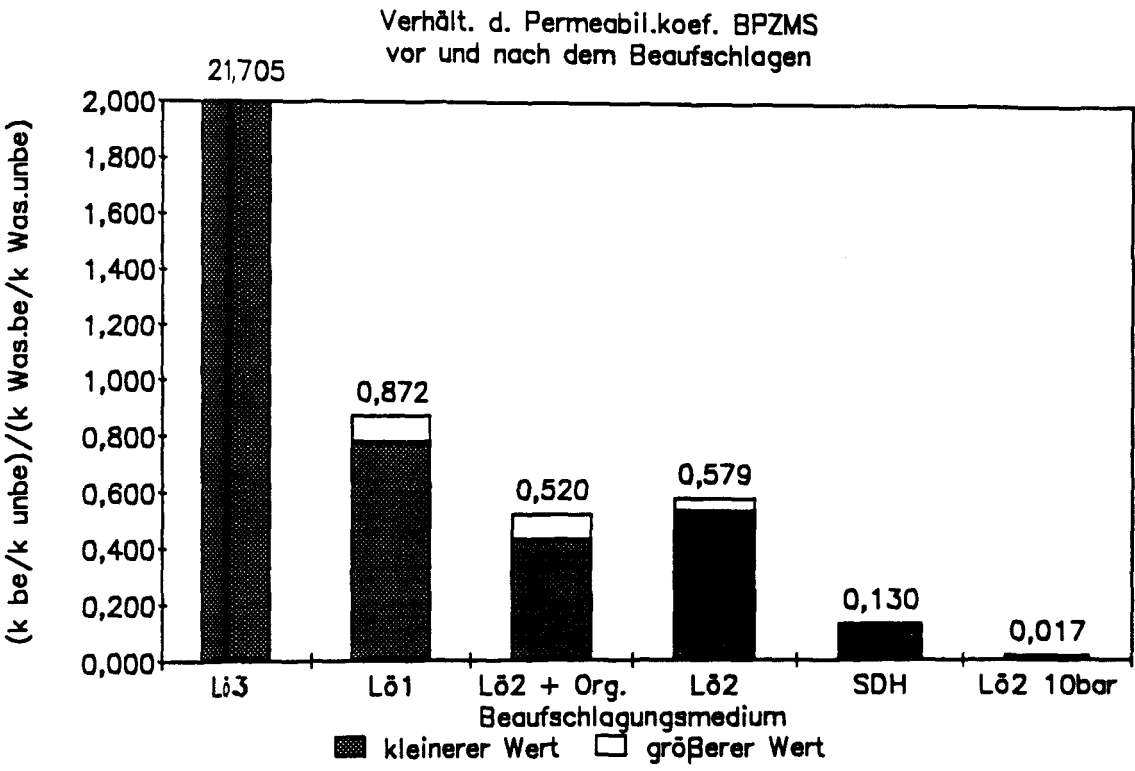
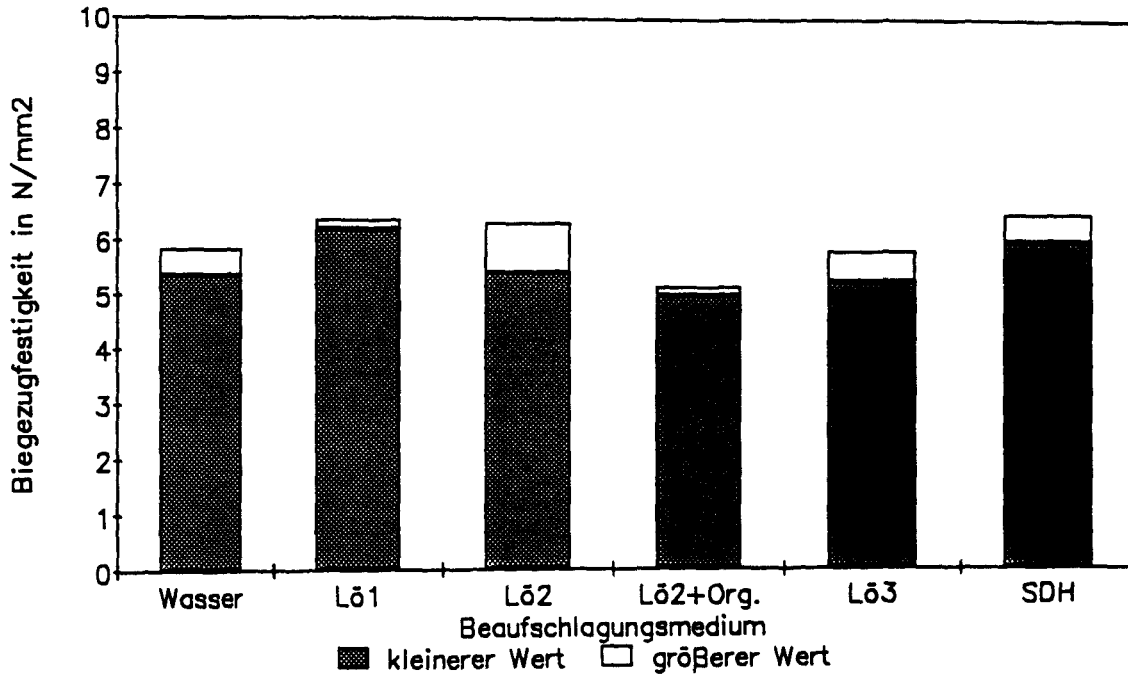


Abbildung 47: Verhältnis der Permeabilitätskoeffizienten vor und nach dem Beaufschlagen, bezogen auf das Verhältnis bei Wasserlagerung. Oben: Beton BPZMS. Unten: Beton BPZMSFA.

Biegezugfestigkeit Beton BHOZ  
nach dem Beaufschlagen



Biegezugfestigkeit Beton BHOZFA  
nach dem Beaufschlagen

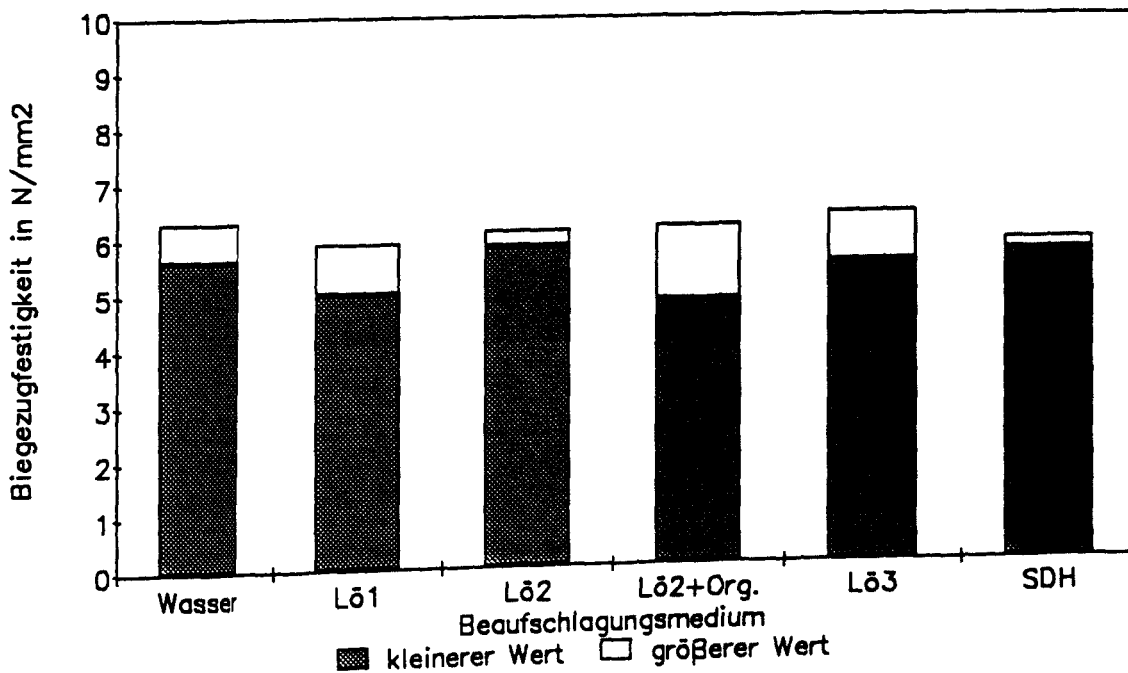


Abbildung 48: Oben: Biegezugfestigkeit des Betons BHOZ nach dem Beaufschlagen. Unten: Biegezugfestigkeit des Betons BHOZFA nach dem Beaufschlagen.



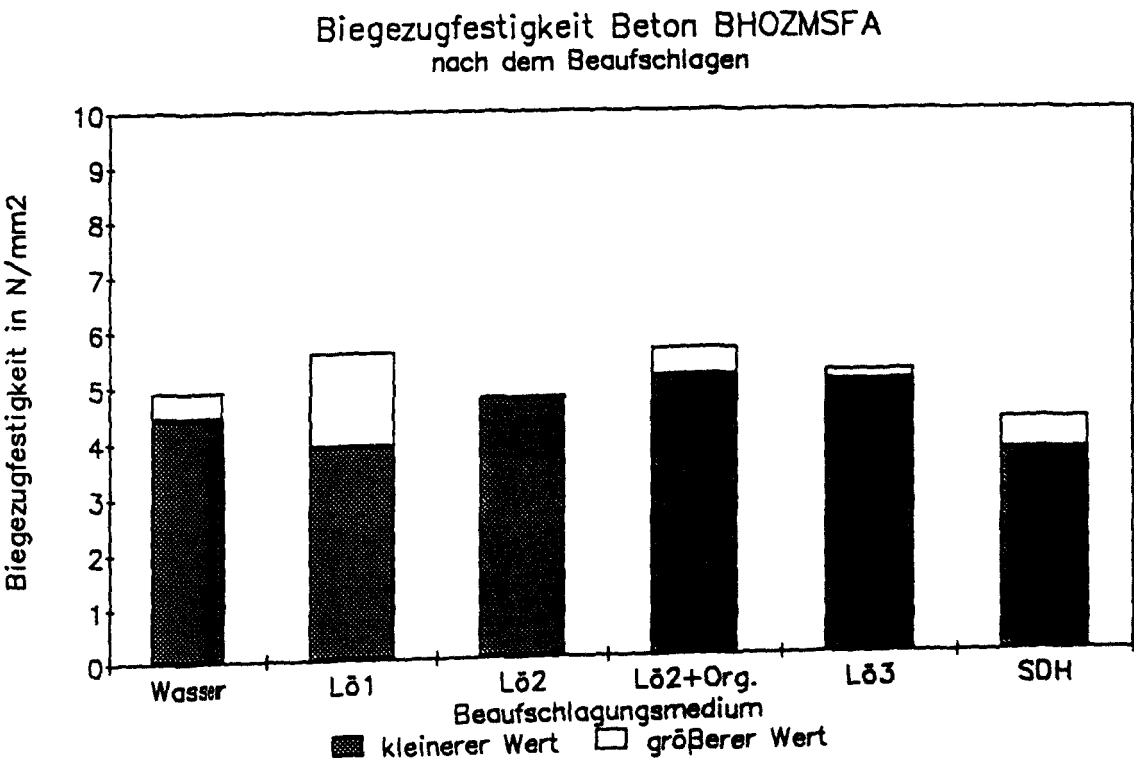
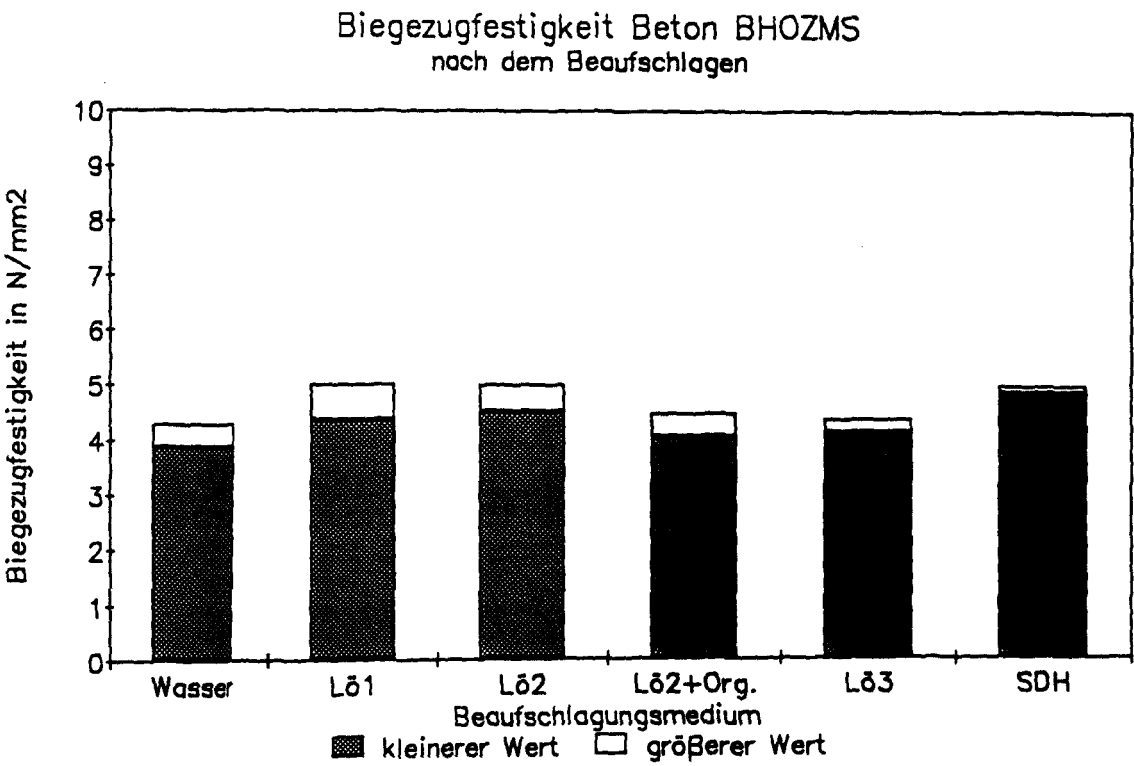
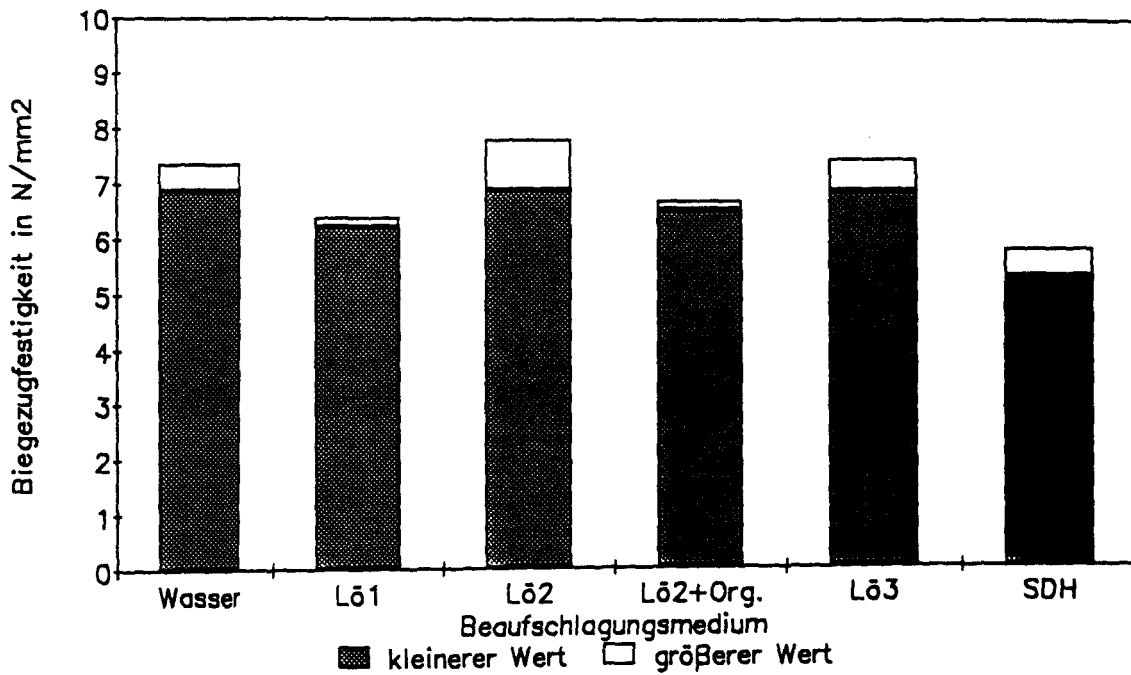


Abbildung 49: Oben: Biegezugfestigkeit des Betons BHOZMS nach dem Beaufschlagen. Unten: Biegezugfestigkeit des Betons BHOZMSFA nach dem Beaufschlagen.

Biegezugfestigkeit Beton BPZ  
nach dem Beaufschlagen



Biegezugfestigkeit Beton BPZFA  
nach dem Beaufschlagen

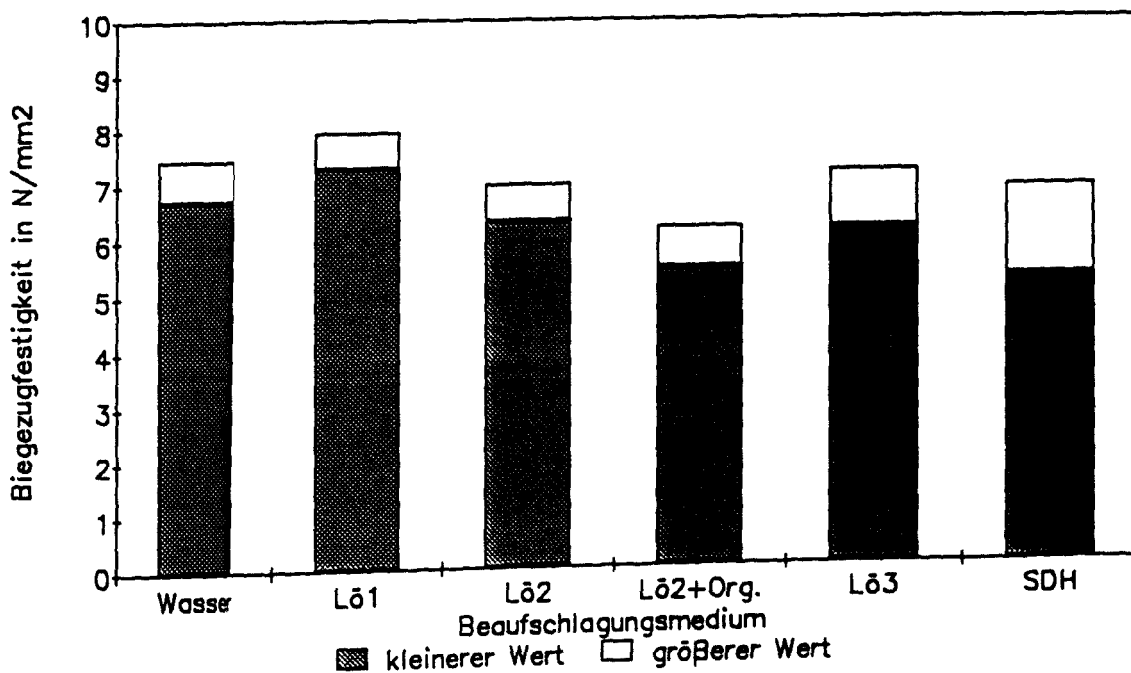
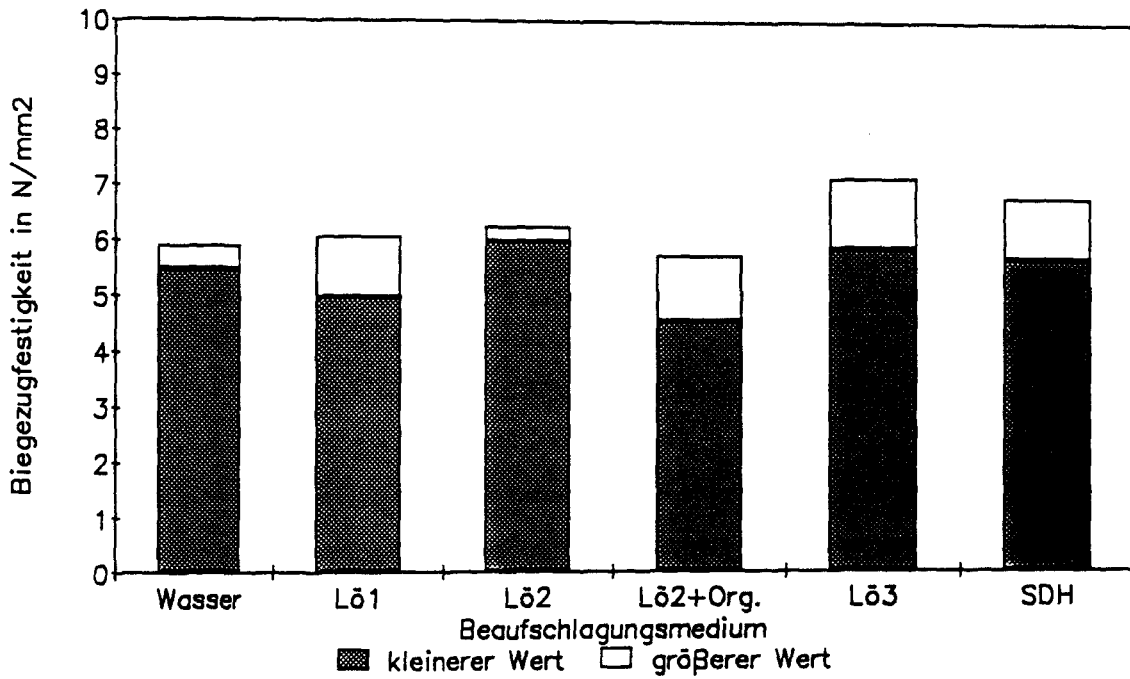


Abbildung 50: Oben: Biegezugfestigkeit des Betons BPZ nach dem Beaufschlagen.  
Unten: Biegezugfestigkeit des Betons BPZFA nach dem Beaufschlagen.

Biegezugfestigkeit Beton BPZMS  
nach dem Beaufschlagen



Biegezugfestigkeit Beton BPZMSFA  
nach dem Beaufschlagen

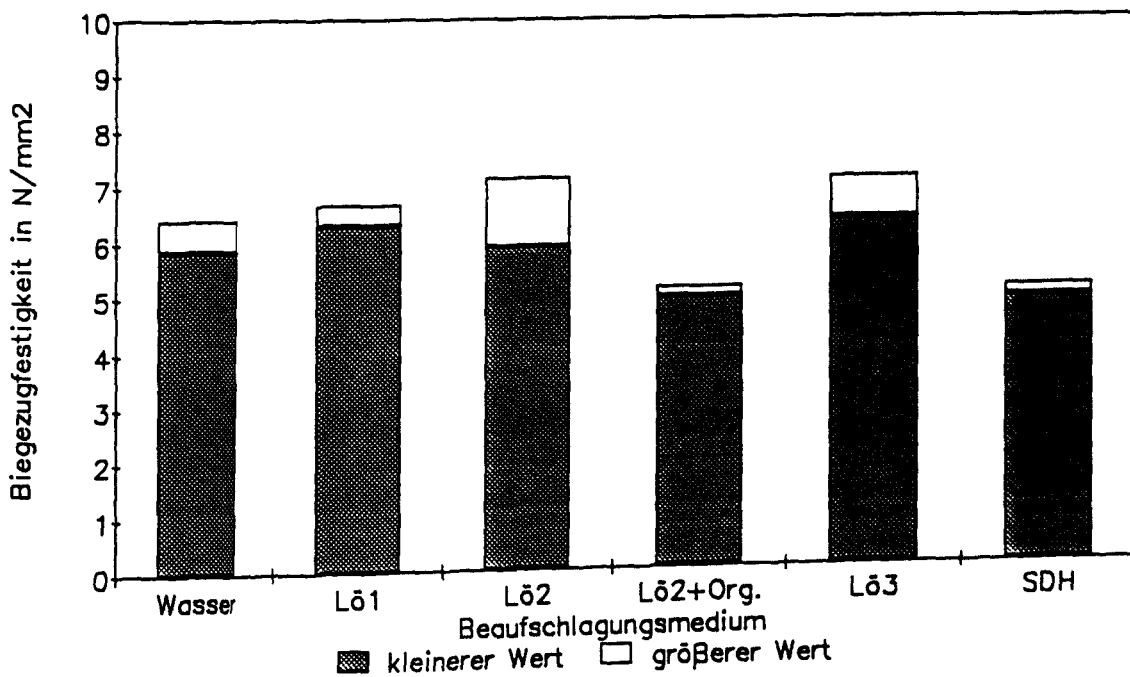


Abbildung 51: Oben: Biegezugfestigkeit des Betons BPZMS nach dem Beaufschlagen. Unten: Biegezugfestigkeit des Betons BPZMSFA nach dem Beaufschlagen.

**Danksagung:**

Wir danken dem Wilhelm Klauditz Institut der Fraunhofer Arbeitsgruppe für Holzforschung, Braunschweig, für die Möglichkeit Korngrößenanalysen mit dem dort vorhandenen Laser-Granulometer durchführen zu können.